

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ ЗАРЯДОВ В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ

Н.Такибаев, д.ф.-м.н., А.Сарсембаева, М.Такибаева, teta@nursat.kz, КазНУ им. Аль-Фараби;
Д.Насирова, КазНПУ им. Абая, Алматы, Казахстан

Солнечное излучение и космические лучи вызывают в ионосфере процессы ионизации и рекомбинации, которые играют важную роль в образовании грозowych облаков и мезосферных серебристых облаков. Интерес к ним подогревает активный запуск ракет с водородно-кислородными двигателями, которые заносят в мезосферу водяной пар.

Наша Земля, как известно, находится под “властью” Солнца, периоды активности Солнца во многом определяют земные климатические изменения. Широкое обсуждение планетарных угроз: глобальное потепление, опустынивание земель, рост кризисных ситуаций в большинстве регионов – подчеркивает важность исследований атмосферных явлений [1, 2]. В статье рассмотрены процессы формирования объемных зарядов грозowych тропосферных облаков и мезосферных серебристых облаков в атмосфере Земли. В основу исследований положены методы термодинамического описания равновесных и квазиравновесных процессов, которые базируются на квантовой теории взаимодействия частиц – элементарных составляющих этих газовых сред [3, 4].

Именно квантовая механика способна объяснить многие важные явления и процессы, происходящие в различных макроскопических объектах. Полное рассмотрение должно быть, конечно, дополнено теоретическими методами теплофизики, физики плазмы, динамики турбулентных движений и т.п.

Мы ограничимся низшим уровнем описания – учетом основных характеристик квантовых состояний ионов, атомов и молекул, участвующих в рассматриваемых процессах. При небольших плотностях газов и скоростях потоков воздуха такое описание можно считать состоятельным.

ОСОБЕННОСТИ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

Нижние слои земной атмосферы насыщены парами воды. Между ее локальными воздушными объемами возникают термодинамические и кинетические различия. Это ведет к возникновению разницы в их скоростях гидратации (захват молекул воды) и кластеризации зарядов разного знака (образование заряженных капелек воды с ионом или молекулярным радикалом в центре). Значения энергетических уровней возбуждения частиц, элементарных составляющих воздуха, отличаются друг от друга, имеют разную энергетическую емкость, разные скорости реакций ионизации, диссоциации, перезарядки и рекомбинации.

Более того, некоторые термодинамические характеристики (например, удельные концентрации) для каждого типа частиц по своему функционально зависят от температуры среды. Таким образом, микроскопические характеристики создают условия для макроскопической дифференциации (т.е. пространственного разделения) частиц в некоторых средах. Например, в более холодных воздушных массах образуются преимущественно отрицательные заряженные кластеры – т.е. заряженные отрицательно капельки воды, а в более теплых массах – положительно заряженные кластеры [3].

Хотя в каждом частном случае ситуация с образованием заряженных кластеров и капелек воды зависит от конкретных свойств ионов – центров гидратации и кластеризации, а также от макрохарактеристик воздушных потоков: температуры, скорости их движения, влажности, состава примесей и т.д. [5–7].

Грозowymi облаками называют облака, которые сопровождаются молниями. Наличие молний говорит о процессах электрического разряда, происходящих внутри облака или между облаками, или между облаком и землей.

Земная атмосфера представляет собой хороший диэлектрик, расположенный между двумя проводниками: поверхностью земли и ионосферой. Между ними поддерживается постоянная разность потенциалов величиной ~ 300 тысяч вольт. Обычно нижние части грозowych облаков имеют отрицательный заряд, а верхние – положительный [6, 7].

При накоплении достаточного напряжения в облаке или между облаками происходит электрический пробой – молния. Модели молний активно исследуются в последнее время [5–9]. Но сложность проблемы заключается в том, что в молниевых процессах задействовано множество явлений, характерные значения которых различаются между собой на десятки порядков. Например, раз-

деление зарядов на молекулярном уровне и вспышки молний несколько километров длиной, или конвекционные потоки воздуха, которые могут охватывать континенты. Недавние эксперименты показали [6–9], однако, что многие грозовые облака обладают сложной зарядовой структурой – до шести слоев.

Интересный механизм, где ключевую роль играют ионизационные излучения, был предложен в работе [9]. К этим излучениям относятся радиоактивные газы, выносимые в атмосферу из недр земли, и поступающие из космоса галактические лучи, порождающие широкие атмосферные ливни (ШАЛ), а также солнечный ветер и рентгеновское и ультрафиолетовое излучение от Солнца.

Подчеркнем некоторые общие черты грозовых процессов. Их подтверждают метеорологические наблюдения и прямые исследованиями, лабораторные и модельные эксперименты. Во многих теоретических моделях грозового

облака и предлагаемых механизмах учитывают, что:

- грозовым облакам сопутствует движение больших масс воздуха, насыщенного водяным паром;
- потоки воздушных масс имеют разные средние температуры – теплые потоки пронизывают холодные потоки или сталкиваются с ними, внутри грозового облака имеет место конвекция потоков;
- молнии инициируются внешними воздействиями (космическими лучами – ШАЛ);
- грозовые облака могут иметь сложную структуру как по температуре, так и по конфигурации электрических полей;
- грозовые облака являются важной частью глобальной электрической сети планеты Земля.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВОДНЫХ КАПЕЛЬ В ОБЛАКАХ

Будем считать, что в газовой среде образуется в результате столкновений достаточное количество

ионов, которые могут рекомбинировать или стать центрами образования водных капель и просуществовать в таком состоянии значительное время.

Ионизационное равновесие в такой среде будем описывать методом Саха [10, 11]. В классическом варианте этот метод определяет степень ионизации слаборазреженной плазмы в зависимости от температуры. Будем определять аналогичным образом степень комплексности (массивности) кластера. К примеру, рассмотрим кластер типа: $O \cdot (H_2O)_n$ и рассмотрим процессы последовательного отделения (присоединения) молекул воды от ионов и ионных кластеров [4].

При термодинамически равновесных процессах в системе константы равновесия $K^{(n)}(T)$ не зависят от деталей химических реакций. Они определяются лишь энергиями соответствующих квантовых состояний и температурой. В этом случае можно записать:

$$\frac{C_{n+1}}{C_n \cdot C} = PK^{(n)}(T), \quad (1)$$

где C_n – концентрация кластеров с определенным значением n ; C – концентрация молекул воды в целом, т.е. как свободных, так и захваченных ионными комплексами. Величина C может быть нормирована условием:

$$C = \sum_{n=1}^N n \cdot C_n \quad (2)$$

где N – максимально возможное значение n .

Масса кластера, т.е. величина N , ограничена условием баланса между энергией связи и поверхностным натяжением молекул воды в кластере. Величина C – концентрация молекул паров воды. Считаем, что она определяется начальными условиями задачи и не зависит от последующих локальных изменений температуры.

Константы равновесия $K^{(n)}(T)$ могут быть определены из выражений [4, 10, 11]:

$$K^{(n)}(T) = \frac{g_{n+1}}{g_n \cdot g} \left(\frac{2\pi \cdot m_{n+1}}{m_n \cdot m} \right)^{3/2} T^{-5/2} \exp\left(\frac{I_n}{T}\right), \quad (3)$$

где g_n , m_n – статистический вес и масса соответствующего кластера, g , m – статистический вес и масса молекулы H_2O , соответственно. Величина $I_n = \varepsilon_{0,+1} - \varepsilon_{0,n}$ – энергия n -го присоединения (прилипания) к кластеру молекулы.

Мы будем пользоваться системой единиц, в которой для простоты записи положено: $c=1$, $h=1$, и постоянная Больцмана также положена равной единице: $k=1$. Это отражено в записи формулы (3). Полагая $n \gg 1$, будем считать, что в довольно широких пределах значений n энергия прилипания молекулы к кластеру не зависит от этой величины. Действительно, в процессах роста многих кластеров такая закономерность имеет место, включая процессы гидратации [12–14]. Таким образом, можно принять, что $I_n = \Delta\varepsilon_n \approx \varepsilon_0$.

Считая, что масса кластера растет монотонно с ростом числа n , и статистические веса кластеров при этом почти не меняются, получим, что правые части (3) при больших

n от самой величины n перестают зависеть.

Тогда выражение (3) можно упростить, введя:

$$\begin{aligned} \alpha(T) &= CPK^{(n)}(T) \approx \\ &\approx CPK(T) \approx \\ &\approx \frac{C}{g} \left(\frac{2\pi}{mT} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{\varepsilon_0}{T}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение (1) можно привести к виду:

$$\begin{aligned} \frac{C_{n+1}}{C_n} &= \frac{C_n + \Delta C_n}{C_n} = CPK^{(n)}(T) \\ (T) &\approx CPK(T) = \alpha(T), \end{aligned} \quad (5)$$

и, определяя функцию $C(n)=C_n$, записать (5) в дифференциальной форме:

$$\frac{d}{dn} \ln\{C(n)\} = \alpha(T) - 1 \quad (6)$$

Его решение имеет простой вид:

$$C(n) = B \cdot \exp\{n \cdot (\alpha(T) - 1)\}, \quad (7)$$

где $B=B(T)$ можно определить из нормировочного условия (2), записанного в интегральной форме:

$$C = \int_1^N dx \cdot x \cdot C(x). \quad (8)$$

Если параметр $\alpha = \alpha(T) < 1$, то с точностью до членов $\sim N^{-1/3}$ получим

$$B(T) \approx C \cdot \frac{(1-\alpha)^2}{(2-\alpha)} \exp(1-\alpha). \quad (9)$$

и, соответственно,

$$C(n) = C \frac{(1-\alpha)^2}{2+\alpha} \times \exp\{-(n-1) \cdot (1-\alpha)\}. \quad (10)$$

Отсюда следует, что концентрации $C(n)$ при $n \gg 1$ будут экспоненциально подавлены. Основную роль в этом случае будут играть только малые кластеры.

В ситуации, когда $\alpha > 1$, решения для $C(n)$ принимают вид:

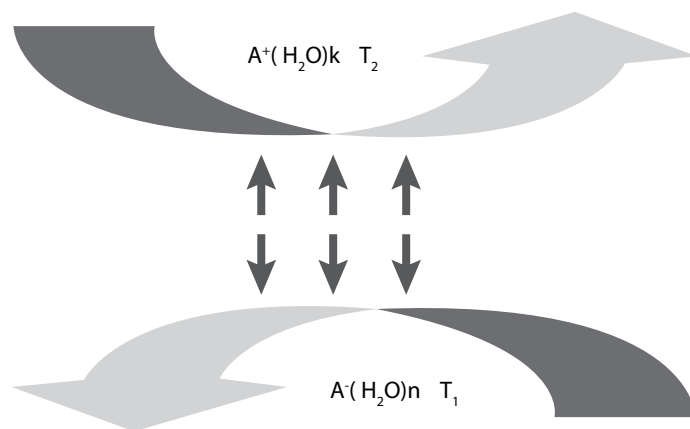
$$C(n) = \frac{C \cdot (\alpha - 1)}{N} \times \exp\{-(N-n) \cdot (\alpha - 1)\}. \quad (11)$$

Из (11) видно, что будут подавлены почти все кластеры, за исключением самых массивных, т.е. тех, у которых $n \approx N$. Величина $\alpha(T)$ может быть найдена из выражения (4) и записана в приближенной форме:

$$\alpha(T) \approx \exp\{\varepsilon_0 / T - \beta(T)\}. \quad (12)$$

Критическим является значение $\alpha_c = \alpha(T_c) = 1$. Когда $\alpha(T) > \alpha_c$ идет быстрое образование массивных кластеров, а когда $\alpha(T) < \alpha_c$ – их распад.

Если температура T велика, то величина ε_0/T будет мала так, что $\alpha(T) < 1$. При низких температурах величина ε_0/T может стать, наоборот, очень большой и $\alpha(T) > 1$. Такие температуры и приводят к образованию массивных кластеров, т.е. крупных капелек воды, а из них – кристалликов льда.



Модель столкновения встречных потоков

Оценим значения параметров α и β в области формирования грозовых облаков. Грубые оценки дают:

$$\beta(T) \approx 9 + 1,5 \cdot \ln\left(\frac{T}{300}\right) - \ln \tilde{C}, \quad (13)$$

где \tilde{C} – концентрация паров воды, взятая в процентах. Сама эта концентрация, конечно, зависит от температуры воздуха. В выражении (13) за точку отсчета взята температура 300К.

Полагая, например, энергию прилипания $\epsilon_0 \approx 0,09$ эВ, для $T_1 \approx 283$ К получим $\epsilon_0/T \approx 3,69$. В области $T_2 \approx 303$ К будет $\epsilon_0/T \approx 3,45$. Тогда α не сможет превысить свою критическую величину, даже если концентрация паров воды будет высокой. В этом случае крупные водные капли вообще не будут образовываться.

Энергия гидратации ионного комплекса ОН⁻ равна 339 кДж/моль (или 3,51 эВ). Это дает в области T_1 значение $\epsilon_0/T \approx 130$. Что указывает на большую способность комплекса образовывать крупный ионный кластер, т.е. такие ионные комплексы тоже являются центрами

образования крупных водных капель.

Большое значение для процессов формирования водных капель имеет начальная концентрация молекул воды в потоке воздуха.

Конечно, сила прилипания молекулы воды к иону, имеющему большую энергию гидратации, экранируется первыми нижними слоями молекул воды, но не компенсируется полностью. Это является следствием высокого дипольного момента у молекулы воды и ее сильными водородными связями. Энергия гидратации остается на верхнем уровне энергии диссоциации кластерных ионов даже при больших значениях n , т.е. для комплексов $A^{\pm}(H_2O)_n$, где A обозначает ион или радикал.

Отметим, что ионизация (или ионизационная диссоциация) молекул кислорода O_2 и, тем более, азота N_2 является практически маловероятной при атмосферных температурах, которые для этих процессов еще не достаточно высоки. Так, известно, что азот часто используется как инертный на-

полнитель для предотвращения электрического пробоя во многих физических приборах и установках.

Относительно других примесей можно сказать, что их концентрации в атмосфере ничтожны по сравнению с парами воды и поэтому их вкладом можно пренебречь. Однако при высоких концентрациях эти примеси (ионы железа, алюминия и некоторых других) могут значительно ускорить процессы гидратации и вызвать быстрое выпадение осадков. Это часто используют для принудительного выпадения осадков, т.е. устранения облаков и создания «хорошей погоды».

ПРОБЛЕМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ГРОЗОВЫХ ОБЛАКОВ

Необходимым условием для возникновения грозового облака является конвекция воздушных потоков, обогащенных парами воды. Рассмотрим столкновение двух встречных воздушных потоков, имеющих разные температуры.

Восходящие и нисходящие потоки в изолированных грозах обычно имеют диаметр 0,5–2,5 км и высоту 3–8 км. Иногда диаметр восходящего потока может достигать 4 км. Вблизи поверхности земли потоки обычно увеличиваются в диаметре, а скорость в них падает по сравнению с вышерасположенными потоками. Характерная скорость восходящего потока лежит в диапазоне 5–10 м/с и доходит до 20 м/с в верхней части крупных гроз. Наиболее сильные восходящие потоки наблюдаются в организованных грозах [5–7].

В области трения, которая образуется в результате столкновения встречных потоков воздуха (см. рисунок), возникают молекулярные ионы. Ионы, имеющие более сильную способность к гидратации, становятся центрами образования крупных водных капель. Это относится, в первую очередь, к отрицательно заряженным кластерам. Более мелкие капли оказываются в основном заряженными положительно и будут оставаться в области более высоких температур. Эти два фактора – масса кластера и температурная преференция по росту и концентрации – создают основу для пространственного расслоения кластеров с разными массами и зарядами. Действительно, поток воздуха, имеющий более высокую температуру, будет увлекать более легкие кластеры, имеющие в основном положительные заряды. А поток воздуха с более низкой температурой будет обогащаться более массивными кластерами, имеющими отрицательные заряды.

Подчеркнем, что в результате диффузии (противопоточная масс-диффузия) и термодиффузии ионные кластеры разных типов уже пространственно разделяются внутри области трения. Более крупные кластеры, имеющие отрицательный заряд, скапливаются ближе к потоку T_1 , а более легкие кластеры, имеющие положительный заряд, скапливаются у потока T_2 . Таким образом, холодные потоки будут обогащаться отрицательным объемом зарядом и более крупными водными каплями, а теплые потоки – положитель-

ным зарядом и более мелкими каплями.

Следует отметить, что потоки воздуха у земной твердой поверхности будут накапливать в основном отрицательный заряд, т.е. земля будет положительной по заряду, что связано со свойствами твердых тел, являющихся хорошими проводниками тепла и электричества.

Оценим грубо величину заряда в небольшом облачке. Считая, что ионизируется одна молекула воды на миллион (это очень низкое значение), получим суммарное число заряженных частиц, образующихся в области трения: $N_{\text{ИОН}} = C \cdot V_T \cdot N_A / 10^6 \approx 7 \cdot 10^{25}$. Здесь V_T – объем области трения, а N_A – число Лошмидта. Некомпенсированный заряд будет равен: $Q \approx 5,4 \cdot 10^6$ Кл. Таким образом, в нашем небольшом модельном облачке уже будет запасен огромный потенциал энергии.

Известно, что накоплению заряда будет противодействовать пробойный разряд, который во влажном воздухе составляет ~ 5–10 кВ/см. Размеры облака будут во многом определяться динамикой атмосферных смен различных потоков, восходящих и нисходящих, географическими особенностями и т.д. [5–9]

На самом деле, картина, конечно, значительно более сложная и более богатая, чем здесь была рассмотрена. Нашей задачей было максимально упростить модель грозового облака, для того, чтобы показать возможность микроскопического рассматривания физических процессов.

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ МЕЗОСФЕРНЫХ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Известно, что в промежуточном слое между стратосферой и термосферой – мезосфере – на высоте около 85 км (D-область) образуются серебристые облака (МСО). Характер рассеяния солнечного света серебристыми облаками позволил установить, что они представляют собой скопления частиц размером 0,1–0,7 мкм. О природе этих частиц высказывались самые разные гипотезы – это ледяные кристаллы, мелкие частицы вулканической пыли, кристаллы в ле-

дяной "шубе", космическая пыль, частицы метеорного или кометного происхождения.

Процесс формирования этих облаков изучается все активнее в связи с запусками ракет. Дело в том, что запуски космических аппаратов с водородо-кислородными двигателями служат причиной заноса водяного пара в мезосферу и, следовательно, стимулируют формирование облаков. Появление в этой области облаков может создать проблемы при возвращении космических аппаратов на Землю.

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.

Существенный вклад в ионизацию вносят корпускулярные потоки, например электроны с энергией $\varepsilon < 40$ кэВ, а также солнечное излучение первой линии серии Лаймана с $\lambda = 1215,7 \text{ \AA}$ [15].

Скорость исчезновения ионов характеризуется эффективным коэффициентом рекомбинации α , который определяет величину концентрации электронов n_e и ее изменение во времени. На малых высотах значение α на несколько порядков выше, чем ее значение 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 других. Важно отметить, что отрицательные ионы наблюдаются лишь в D-области.

Концентрация электронов в области D при переходе от дня

к ночи еще больше уменьшается, поскольку ионизирующее излучение от Солнца закрывается Землей. Наконец, в области D и в области E ионосферы иногда наблюдаются кратковременные, очень узкие слои повышенной ионизации, состоящие из многозарядных ионов Mg, Fe, Ca и др. Они представляют собой следы метеоритов и других тел, проходящих через толщу атмосферы.

Приведенные здесь особенности протекания процессов в мезосфере позволяют описывать их как процессы в слабо ионизированной ионной плазме без участия свободных электронов. При этом среда будет представлять собой почти идеальный разреженный газ, постоянный по составу: 80% N_2 и 20% O_2 .

Указанная область имеет интересные физические свойства, отличающиеся от других слоев атмосферы. Ионизационные и температурные характеристики здесь таковы, что этот слой естественным образом детектирует треки инородных тел. Можно сказать, что эта область мезосферы представляет собой природную камеру Вильсона, функционирующую, конечно, в иных временных, пространственных и температурных режимах, в отличие от известных лабораторных устройств.

Рассмотрим состояние области D нижней ионосферы, например, в дневной период времени. Поток солнечной радиации, очевидно, будет ионизировать атомы и молеку-

лы среды, но ионизация здесь уже будет значительно меньшей, чем в более высоких слоях ионосферы. При этом плотность воздуха в этой области будет существенно более высокой, чем на больших высотах, но еще малой и сильно разреженной по сравнению с нижними слоями атмосферы.

Отличия будут касаться интенсивности и спектра радиационного излучения, а также температуры среды. Среда в D-области будет слабо ионизирована, причем электронная компонента будет быстро поглощаться нейтральными молекулами, которые начнут пополнять число отрицательно заряженных ионов – важную компоненту такой квазикриогенной плазмы. В ночное время температура резко падает, и начинаются процессы, устанавливающие в среде тепловое и ионизационное равновесие. Это ведет к изменению качественного и количественного состава квазикриогенной плазмы и, соответственно, в самой среде.

В лабораторных условиях рекомбинирующая криогенная плазма помещается во внешнее электрическое поле для того, чтобы поддержать температуру электронной компоненты T_e на заданном уровне [12–14]. В нашем случае поток радиации от Солнца в дневное время естественным образом будет 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.

Важными процессами, происходящими в рассматриваемой области мезосферы, являются процессы коагуляции 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 [14].

Кластерные ионы выступают как центры конденсации паров воды и других веществ тогда, когда давление паров превышает давление насыщенного пара при данной температуре. (Заметим, что именно такой механизм является основой работы камеры Вильсона.) При этом энергия диссоциации кластерных ионов ($\epsilon_c=0,09-1,7$ эВ) в среднем меньше, чем энергия химической связи молекул ($\epsilon_m=0,75-11,1$ эВ), но значительно выше энергии диссоциации вандерваальсовых молекул ($\epsilon_v=0,9 \cdot 10^{-3}-0,105$ эВ).

Рассмотрим модель образования мезосферных серебристых облаков, основываясь на качественных особенностях верхних слоев мезосферы, смене ее температурных и иных физических режимов, а также на процессах образования больших молекулярных кластеров

и особенностях квазикриогенной плазмы [16].

Рассмотрим сначала обычное поведение мезосферы. Днем солнечное излучение и солнечные космические лучи создают в области D относительно небольшую степень ионизации, т.е. слабо разреженную плазму. Наличие здесь молекулярных ионов различного типа, особенно отрицательных, создает условия для образования комплексных или кластерных ионов типа $O^-(H_2O)_n$ при $n \gg 1$. Среднее число и характеристики кластерных ионов могут быть определены в соответствии с приведенными выше формулами и общими оценками.

В ночное время поток частиц и излучения от Солнца закрывается телом Земли, генерация свободных электронов и ионизация в разреженной среде прекращаются, температура среды резко падает. Квазикриогенная плазма переходит в стадию рекомбинации с образованием некоторого числа кластерных ионов, рассеянных хаотично по всей рассматриваемой области.

Затем, при переходе к дневному времени, поток солнечных лучей и частиц приводит к распаду кластеров, появлению новых ионизированных частиц и слабо Разреженной плазмы, и далее весь процесс повторяется.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда происходит неординарное внешнее воздействие. Пусть, например, метеорный дождь пронизывает мезосферу или происходит выброс большого количества вещества, сопровождающий запуск ракетно-космических комплексов. В этом случае в мезосфере возникают большие по протяженности и плотности ионизационные треки, аналогично трекам в камерах Вильсона, в ионизационных счетчиках и в других аналогичных приборах. Главным в нашем случае будет большой масштаб ионизированных участков и их локализация в определенной области мезосферы, то есть возникновение уже других явлений.

В дневной период времени здесь будут возникать значительные по величине ионизационные треки. Солнечная ионизация может

в этом случае рассматриваться как фоновая и незначительная по величине.

Как и ранее, здесь возникают условия образования комплексных и кластерных ионов типа $O^-(H_2O)_n$, но также и новых, например $Fe^{3+} \cdot (H_2O)_n$, $Al^{3+} \cdot (H_2O)_n$ и других. Скоротечность процессов обуславливается быстрым падением температуры при адиабатическом расширении зоны повышенной ионизации. При этом степень роста ионных кластеров будет существенно большей.

При этом свободные электроны будут быстро захватываться молекулами среды, и плазма приобретет свойства чисто ионной, т.е. без электронной компоненты. В такой плазме имеют место так называемые плазменные колебания, участниками которых становятся уже тяжелые заряженные частицы (отрицательные и положительные ионы) и даже массивные ионные кластеры.

В ночное время такая квазикриогенная плазма переходит в стадию адиабатического остывания. В отличие от дневного режима здесь формируются более крупные по размеру кластеры (жидкие капли). Все они будут сосредоточены вблизи ионизационных треков.

При переходе к дневному времени солнечные лучи будут высвечивать эти облака ледяных кристалликов, называемых мезосферными серебристыми облаками. Усиливающийся поток солнечных лучей и частиц приводит к медленному испарению ледяных кристалликов.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ МСО

Рассмотрим низкотемпературную плазму по составу и характеристикам, близким к условиям мезосферы, где образуются серебристые облака. Ионизационное равновесие в такой плазме снова опишем методом Саха. Как и выше (смотри предыдущий раздел), будем определять степень комплексности (массивности) кластера и рассматривать процессы последовательного отделения (или присоединения) молекул воды от ионных кластеров.

Приведенные формулы и выкладки (1–13) будут в еще большей степени правомерны для рассмотрения процессов в МСО. Обращаясь к этим формулам, выразим величину $\beta(T)$ с привязкой к условиям, специфичным для высот мезосферы. Выберем область температур вблизи температурной точки $T=300K$, а значения концентраций – вблизи концентраций $C=10^{-6}$, характерных для областей МСО.

Отметим, что $\beta(T)$ является функцией, слабо зависящей от температуры:

$$\beta(T) \approx 18.19 + \frac{3}{2} \ln \left\{ \frac{T(^{\circ}K)}{300} \right\} - \ln \{ C \cdot 10^6 \}. \quad (14)$$

Как и ранее, критическим является значение $\alpha_c = \alpha(T_c) = 1$. Когда $\alpha(T_c) > 1$, идет быстрое образование массивных кластеров, а когда $\alpha(T_c) < 1$, – их распад.

Если температура T велика, то величина ϵ_0/T будет мала так, что $\alpha(T) < 1$. При низких температурах величина ϵ_0/T может стать, наоборот, очень большой и $\alpha(T) > 1$. Такие температуры и приводят к образованию массивных кластеров, а из них – кристалликов льда. Их скопление и будет представлять собой серебристые облака.

Оценим критическое значение параметра α_c . В D-области мезосферы температуры меняются в интервале $\sim 170-230K$, т.е. соответствуют энергиям $\sim 0,0147-0,0198$ эВ.

Полагая, например, энергию диссоциации равной $\epsilon_0 \approx 0,09$ эВ, получим для ночных температур в D-области $\epsilon_0/T \approx 6,14$. В дневное же время $\epsilon_0/T \approx 4,5$. В случае $\epsilon_0 \approx 0,423$ эВ, получим $\epsilon_0/T \approx 29$ для ночного времени и $\epsilon_0/T \approx 18$ для дневного времени. Если же, $\epsilon_0 \approx 1,7$ эВ, то для ночных температур имеем $\epsilon_0/T \approx 116$, а для дневных – $\epsilon_0/T \approx 86$.

Очевидно, что комплексы на основе ионов будут являться более мощными центрами конденсации, чем многие другие. Оценки, данные выше, показывают, что уже в рассматриваемых диапазонах температур $T=230-170K$ и концентраций $C \approx 10^{-6}-10^{-7}$, процессы гидратации могут реализоваться, если

ионные комплексы, будут иметь $\varepsilon_0 > 0,26$ эВ. Имеющиеся опытные данные по концентрациям паров воды в верхних слоях атмосферы имеют неопределенности и достаточно большой разброс [15]. Но даже в рамках полученных здесь грубых оценок уже можно говорить об удовлетворительном согласии предлагаемой плазменной модели образования МСО и опытных данных.

Проведенный анализ позволяет констатировать, что многое в физике атмосферных явлений Земли еще не исследовано, но они являются интересными и важными для науки «погода Земли». А, используя методы квантовой теории и квантовой статистики, можно достичь определенного понимания в механизмах формирования грозных облаков и понять некоторые физические явления, происходящие в атмосфере Земли. Наблюдение МСО и определение их связи с солнечной активностью и тех-

ногенными событиями может оказаться весьма интересной и полезной задачей.

Дело в том, что D-область мезосферы является самой спокойной, циклично меняющейся за сутки областью в атмосфере, но ее интегральные изменения за месяц или за год могут отражать характеристику «здоровья» нашей планеты и нашей атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Марчук Г., Кондратьев К., Козодеров В., Хворостьянов В.** Облака и климат. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986.
2. **Williams E.R.** – Atmos. Res., 2005, v.76. p. 1.
3. **Такибаев Н.Ж., Спанова Г.А.** – Вестник КазНУ им. Аль Фараби. Серия физическая, 2006, №2 (22).
4. **Такибаев Н., Чечин Л., Омаров Ч.** – Доклады НАН РК, 2006, т.4.
5. **Rakov V., Uman M.** Lightning: physics and effects. – Cambridge, 2002.
6. **Ермаков В., Стожков Ю.** Физика грозных облаков. – Препринт ФИАН, 2004, № 2.
7. **Трахтенгерц В., Иудин И.** Актуальные проблемы электро-

динамики грозного облака. – Известия вузов. Радиофизика, 2005, т.48, №.9.

8. **Stolzenburg M. et al.** – J. Geophys. Res., 1998, v.103.
9. **Ermakov V., Stozhkov Y.** New mechanism of thundercloud and lightning production. – Proceedings of 11th International Conference on Atmospheric Electricity. – Alabama, USA, 1999. p. 242.
10. **Ландау Л., Лифшиц Е.** Статистическая физика. – М.: Наука, 2001.
11. **Франк-Каменецкий Д.** Лекции по физике плазмы. – Интеллект, 2008.
12. **Смирнов Б.** Комплексные ионы. – М.: Наука, 1983.
13. **Смирнов Б.** Генерация кластерных пучков. – УФН, 2003, т. 173, №6.
14. **Smirnov B.** Clusters and small particles in Gases and Plasmas. – New York: Springer, 2000.
15. **Лазарева А.И., Савиных В.П.** Серебристые облака: взгляд из космоса. – М.: Наука, 1997.
16. **Асиновский Э., Кириллин А., Раковец А.** Криогенные разряды. – М.: Наука, 1988.