

ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ НЕРАВНОВЕСНОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ, КАК ОТКРЫТОЙ СИСТЕМЫ

В.М. Сомсиков

Институт ионосферы, Алма-Ата, Казахстан

Обсуждаются математические и физические проблемы, а также пути построения теоретической неравновесной модели атмосферы, как открытой системы. Определены некоторые принципы ее создания.

Введение

Глобальное изменение климата требует создания эволюционной модели атмосферы, т.е. такой модели, которая позволяет предопределять характер ее развития на длительный период времени. Сложность этой задачи, прежде всего, обусловлена тем, что атмосфера является открытой неравновесной системой, т.е. наблюдаемые в ней процессы и их эволюция определяются связью атмосферы с внешним миром. Главная из причин, почему современной аппарат математической физики не позволяет строить эволюционную модель открытой системы, заключается в том, что уравнения современной математической физики развиты для консервативных систем, т.е. систем, динамика которых определяется законами сохранения. Но для открытых систем эти законы не выполняются. Поэтому при их изучении приходится ограничиваться феноменологическими теориями, которые плохо применимы для построения эволюционных моделей открытых систем.

Наиболее современным математическим аппаратом, который позволяет анализировать неравновесные процессы в сплошных средах, является феноменологический аппарат неравновесной термодинамики, но и он недостаточно развит для создания эволюционной модели атмосферы. К математическим трудностям, с которыми приходится сталкиваться при его использовании, прежде всего, относятся нелинейные проблемы, проблемы неустойчивости атмосферы в определенных интервалах значений ее параметров. Так, с его помощью трудно учесть

изменения различных внешних факторов, таких, как альbedo Земли. Сложно оценить влияние на атмосферу естественных и антропогенных выбросов и т.п. Но главная трудность по созданию эволюционной модели атмосферы, все же, связана со слабым развитием физической теории открытых систем из-за недостаточного знания основанных законов возникновения и развития структур в открытых системах [21]. Например, нет ясности в том, как в гравитационном поле при наличии потока солнечной радиации, плотность и давление атмосферного газа зависит от температуры [1]. Все это ограничивает исследования в области изучения климата, главным образом, проведением экспериментов и анализом полученных данных с целью поиска эмпирических закономерностей и тенденций его изменения.

На первых шагах создания эволюционной модели атмосферы, как открытой неравновесной системы, в рамках неравновесной термодинамики выполнялись оценки производства энтропии в атмосфере при ее взаимодействии с солнечной радиацией [2]. Позже были рассмотрены некоторые особенности баланса энтропии [3]. На основе теоремы И. Пригожина о минимуме производства энтропии рассматривался вопрос об устойчивости и экстремальных свойствах модели климата [4]. Был выполнен комплексный анализ экспериментальных наблюдений по долговременным изменениям радиационного баланса в атмосфере, цель которого состояла в выявлении тенденций изменения климата [5].

Поскольку найти строгое решение уравнений неравновесной термодинамики для атмосферы практически невозможно, то были предприняты попытки на их основе выявить роль эффектов открытости и неравновесности атмосферы в ее динамике. Для этого выполнялись исследования зависимости собственных колебаний атмосферы от изменения потоков солнечной радиации [6; 7]. Эти исследования проводились на основе линеаризации эмпирических уравнений неравновесной термодинамики, записанных для системы: атмосферный газ -солнечная радиация. В результате теоретических расчетов был обнаружен сдвиг спектра акустико-гравитационных волн, определяемый взаимодействием радиации с атмосферой. Экспериментальная проверка по данным суточной зависимости вариаций давления атмосферы подтвердила наличие обнаруженного теоретическим образом такого сдвига спектра. Этот результат открывает новые возможности по исследованию эффектов неравновесности атмосферы путем измерений ее волновых структур в различные периоды суток и для различных гео- гелиофизических условий.

Созданию и развитию строгой физической теории открытых систем, которая необходима для изучения неравновесной атмосферы, посвящены исследования [8, 9, 20]. Эти исследования столкнулись с большими трудностями. К ним, в частности, относятся проблемы необратимости; нарушения симметрий или фазовых переходов; отсутствия знаний принципов, определяющих возникновение и эволюцию открытых систем. Серьезную трудность представляет вопрос о том, как на основе физических законов, справедливых для подсистем, возникают законы для их систем.

В данной работе будут рассмотрены основные проблемы построения теоретической модели открытой неравновесной атмосферы и связанные с ней фундаментальные

проблемы физики. Будет предпринята попытка определить принципы и пути создания математического аппарата для изучения процессов образования структур в открытой атмосфере, а также их эволюции.

О теории открытых систем.

В природе любые состояния систем являются динамическими. Действительно, все системы состоят из атомов, молекул, объединенных в кластеры. И все они совершают поступательные, колебательные и вращательные движения. Более того, на первый взгляд покоящиеся тела всегда находятся в движении. В связи с этим все тела характеризуются тепловым излучением. Это излучение объясняется наличием тепловых колебаний молекул, атомов вещества. В равновесном состоянии спектр колебаний определяется температурой, что хорошо согласуется с принципом детального равновесия [11]. Наличие теплового излучения, присущего всем без исключения телам, делает невозможным в принципе существование консервативных систем [10]. Таким образом консервативность является приближением для ограниченного класса задач, но если нас интересует природа процессов эволюции, то в этом случае системы необходимо считать открытыми и неравновесными, так как именно открытостью систем обусловлена эволюция.

Спектр равновесного излучения зависит только от температуры, но в общем случае все системы неравновесны. Поэтому излучение реальных тел также неравновесно и зависит, как от вещества, так и от состояния. Теория равновесного излучения развита для случая, когда оно имеет только электромагнитную природу. На самом деле в той или иной степени излучение должно проявляться во всех типах фундаментальных взаимодействий. Так, например, мощные перестройки в звездах и их системах меняют структуры

гравитационных полей, что сказывается на окружающих их небесных телах [22-23].

Условие консервативности систем существенно упрощает их изучение, так как оно позволяет использовать законы сохранения и соответствующий этим законам строгий математический формализм классической механики. К законам сохранения, прежде всего, относятся законы сохранения массы, импульса и энергии. Уравнения динамики выводятся из условия равенства временного изменения соответствующей сохраняющейся величины и дивергенции потока этой величины. Для замыкания системы уравнений используются уравнения состояния. Существенным упрощением для изучения консервативных систем является условие адиабатичности, что эквивалентно пренебрежению процессами производства энтропии или, другими словами, диссипативными процессами [17].

Для открытых систем в общем случае нет сохраняющихся величин. Поэтому для их описания используются уравнения баланса для массы, импульса и энергии с учетом взаимосвязи системы с внешней средой [19]. Очевидно, что это требует дополнительного знания внешних условий. Так, например, в уравнении для массы следует учесть изменения химического состава атмосферного газа при его взаимодействии с солнечной радиацией. В уравнении импульса необходимо учесть диссипативные процессы, обусловленные трансформацией энергии динамических процессов в тепло. В уравнение энергии необходимо ввести в правую часть поток солнечной радиации и уходящий в космос поток теплового излучения атмосферы.

В общем случае получение уравнений баланса затруднено обратной связью между системой и внешним миром. Например, состояние атмосферы существенно зависит от альбедо земной поверхности в точке фазовых переходов воды, но само альбедо зависит от состояния атмосферы. Поэтому на

начальных стадиях изучения открытых систем приходится ограничиваться простейшими моделями без учета обратных связей.

Необходимость учета диссипативных процессов в открытых системах, благодаря которым создаются и поддерживаются их структуры, требует знания уравнения баланса потока энтропии. Баланс энтропии определяется диссипацией различных типов энергии: энергии движения атмосферного газа, солнечной энергии, химической энергии и т.п. В атмосфере, так или иначе, все эти типы энергии связаны с солнечной радиацией. Поэтому сначала требуется получить уравнения для притока энергии радиации в атмосферный газ. Этот приток осуществляется в результате трансформации солнечной радиации при фотохимических реакциях атмосферного газа, при фотоионизации, при трансформации его в инфракрасное излучение. Причем следует учитывать, как прямые потоки энергии от Солнца, так и потоки радиации от поверхности Земли. Более того, существует множество различных каналов преобразования энергии и вещества в самой атмосфере. Поэтому требуется учет законов сохранения для всех каналов и типов энергии с учетом всех взаимосвязей. Следовательно, необходимо строить уравнения для разных типов энергии и вещества в зависимости от изменяющихся внешних условий [14]. Эта задача очень усложняется еще и тем, что атмосфера является многокомпонентной системой. Для каждой компоненты имеются свои коэффициенты, определяющие трансформацию потока радиации во внутреннюю энергию атмосферного газа. Сами процессы такой трансформации являются нелинейными. Поэтому, прежде чем строить современную математическую модель эволюционной атмосферы, необходимо изучить принципы функционирования открытых систем.

Структуризация неравновесной материи

В природных системах неравновесные состояния, как правило, реализуются в виде совокупности аттракторов. Так, каждому стационарному состоянию атмосферы можно поставить в соответствие свои аттракторы. При изменении внешних параметров система может переходить от одних аттракторов к другим. Этот переход, как правило, осуществляется через точки бифуркации. Переход между аттракторами необратим. Именно смена аттракторов атмосферы характеризует ту или иную эпоху на Земле [20]. В этой связи, чтобы определить процесс эволюции атмосферы, нужно знать характер устойчивости всех аттракторов, лежащих в пределах возможных изменений внешних и внутренних параметров. Но для этого надо знать принципы возникновения стационарных состояний для открытых неравновесных систем. Пока что известен лишь принцип минимума производства энтропии, да и то, как показала практика, он не всегда справедлив [4, 19]. На пути к этим знаниям лежат серьезные физические проблемы. Одна из них, которая в течение длительного периода времени оставалась нерешенной - проблема необратимости. Кратко ее суть состоит в следующем.

В основе описания динамических систем лежат уравнения Ньютона для потенциально взаимодействующих **материальных точек (МТ)**. Эти уравнения обратимы. Однако все наблюдаемые процессы в неравновесных системах необратимы. Поскольку симметрия динамических процессов в системе определяется симметрией уравнений, описывающих ее динамику, то возникает серьезное противоречие между математическим аппаратом классической механики, который построен на основе принципов сохранения симметрий пространства и времени, и реальными системами, в которых эти симметрии не сохраняются. Это и составляет

суть **проблемы необратимости**. Поясним, как она решалась [12].

Впервые объяснение необратимости было предложено около 200 лет назад Больцманом. В его основу он положил эргодическую гипотезу. Согласно этой гипотезе все микросостояния системы равновероятны, а значит время нахождения системы в том или ином макросостоянии пропорционально количеству микросостояний, которыми реализуется это макросостояние. Так как равновесное состояние реализуется подавляющим числом способов, то система практически все время должна быть в равновесии. Однако в предложенном объяснении необратимости Больцману так и не удалось связать использование вероятностных законов с детерминизмом классической механики. Кроме того, у этого объяснения есть недостаток. Оно допускает возможность возврата системы в исходное неравновесное состояние, что противоречит практике и второму закону термодинамики.

Открытие динамического хаоса в гамильтоновых системах, которое было сделано в середине прошлого столетия, позволило более тесно связать объяснение необратимости с классической механикой, используя свойство перемешивания гамильтоновых систем. Суть динамического хаоса состоит в том, что система, спустя достаточно большое, но ограниченное время, может пройти сколь угодно близко около любой точки доступного фазового пространства. Однако, для необратимости, требуется огрубления фазового пространства. Механизм такого огрубления неизвестен. Поэтому пришлось опереться на предположение о существовании случайных микрофлуктуаций, но найти объяснение этим флуктуациям в рамках законов классической механики пока не удалось, да и вряд ли это возможно в принципе.

С целью поиска решения проблемы необратимости в рамках классической механики без привлечения статистических гипотез

тез, исследовалась динамика систем упруго сталкивающихся дисков, а затем систем потенциально взаимодействующих МТ. В результате было предложено детерминированное объяснение механизма необратимости [12]. Согласно строгим расчетам, динамика **структурированных частиц (СЧ)**, т.е. частиц, имеющих внутреннюю структуру и потому обладающих внутренней энергией, необратима. Это удалось доказать с помощью уравнения Ньютона для случая, когда СЧ состоят из потенциально взаимодействующих МТ. Так как в основе описания динамики таких СЧ лежит уравнение Ньютона, то их динамика полностью описывается в рамках законов классической механики. Следовательно, в отличие от всех предшествующих объяснений механизмов необратимости, этот механизм является детерминированным. Поясним физику такого механизма необратимости.

Пусть СЧ перемещается по замкнутой кривой. Скорость ее движения определяется скоростью **центра масс (ЦМ)**. Очевидно, что если бы СЧ была твердой, то при возвращении в исходную точку траектории, она вернулась бы в исходное состояние, которое определяется совокупностью микросостояний. Однако из-за структурированности СЧ часть энергии движения перейдет в ее внутреннюю энергию. Поэтому скорость СЧ при ее возвращении в исходную точку будет меньше, чем скорость аналогичного тела, без внутренних степеней свободы. Другим простым примером является качение тела с горки. Чем больше трение, тем больше энергия движения переходит во внутреннюю энергию тела, и тем меньше его конечная скорость. Таким образом, объяснение необратимости фактически сводится к объяснению механизма трения. Механизм трения удалось объяснить, заменив в классической механике модели, состоящие из МТ на модели СЧ. **Отказавшись от идеализации, согласно которой природные объекты рассмат-**

ваются как твердые, бесструктурные тела, не обладающие внутренней энергией, мы пришли к детерминированному объяснению необратимости, а, значит, и к объяснению эволюции в рамках Ньютонской механики.

Возникает естественный вопрос, почему же динамика системы необратима, когда используемое нами для объяснения необратимости уравнение Ньютона, определяющее динамику ее элементов, обратимо?

Изучая системы твердых дисков, мы пришли к выводу, что для описания динамики системы СЧ, ее энергию необходимо представить в виде суммы энергии движения СЧ и их внутренней энергии, определяемой движением МТ. С точки зрения математики, необходимость такого разбиения энергии объясняется независимостью этих типов энергий. Она обусловлена тем, что энергия движения СЧ, определяемая симметрией пространства, меняется в результате ее движения. Изменение внутренней энергии СЧ, определяемой симметрией функции распределения МТ, связано с хаотическим движением МТ относительно ЦМ СЧ [12].

Таким образом, динамика системы, в отличие от динамики МТ, определяется двумя типами симметрии. Симметрия системы определяет характер микродвижений МТ. Симметрия пространства, в котором движется СЧ, определяет движение СЧ в целом. Эти симметрии отвечают за разные типы движения и обуславливают разные типы энергии. Этот вывод можно кратко назвать *дуальностью симметрий*, определяющих динамику систем в неоднородных пространствах. Таким образом, в отличие от консервативных систем, **динамика открытых систем определяется, как симметрией пространства, так и внутренними симметриями самой системы.**

Согласно уравнению движения СЧ, изменение энергии ее движения определяется работой внешних сил. Изменение внут-

ренной энергии также обусловлено работой внешних сил, меняющей распределение элементов СЧ, но не меняющей скорости движения ЦМ. Этим типам энергии соответствуют две силы: потенциальная сила, отвечающая за преобразование кинетической и потенциальной энергий движения ЦМ СЧ, и непотенциальная сила, отвечающая за преобразование энергии движения СЧ в ее внутреннюю энергию. Таким образом, уравнение движения СЧ является обобщением уравнения Ньютона для МТ. Оно переходит в уравнение Ньютона, когда пренебрегается изменением внутренней энергии СЧ.

Неравновесные системы в приближении локального равновесия можно представить совокупностью **равновесных подсистем** (РПС) [19]. Следовательно, неравновесные системы нужно изучать с помощью уравнения движения СЧ при условии, что СЧ представляют собой РПС.

Выше было отмечено, что из-за изменения внутренней энергии при взаимодействии РПС, их динамика определяется как потенциальными, так и непотенциальными силами. Внешними силами по отношению к одной РПС являются силы, действующие со стороны других РПС. *Работа по изменению внутренней энергии РПС осуществляется за счет энергии относительного движения РПС. Она уменьшается в результате перехода во внутрь РПС, достигая нулевого значения в равновесном состоянии. В этом и состоит суть детерминированного механизма необратимости.*

Одним из главных следствий детерминированного решения проблемы необратимости является физическая интерпретация понятия энтропии. *Согласно уравнению движения СЧ, энтропия характеризует долю энергии упорядоченного движения в неравновесной системе, необратимо переходящую во внутреннюю энергию СЧ.* В термодинамическом пределе энергия РПС может характеризоваться температурой.

Таким образом, **представление модели неравновесной системы в виде совокупности РПС, состоящих из потенциально взаимодействующих МТ, позволило найти детерминированное объяснение необратимости в рамках законов классической механики Ньютона.** Это объяснение принципиально отличается от предшествующих тем, что оно получено без привлечения вероятностных принципов и законов. Оно, к примеру, дает возможность предложить объяснение наблюдаемому нарушению симметрии в квантовой теории поля, принципу неопределенности [14]. Таким образом, **классическая механика, в основе которой используется модель СЧ вместо МТ, позволяет описывать процессы эволюции в рамках законов классической механики. Это и есть ключ к построению теории классической механики открытых систем.**

Так как необратимость является необходимым условием возникновения и эволюции систем, то она лежит в основе физики эволюции, описывающей возникновение и развитие природных систем.

Из механизма необратимости следует, что для описания неравновесной системы, какой является атмосфера, прежде всего, необходимо определить все типы энергии, которые определяют ее динамическую структуру. Для описания трансформации этих типов энергии необходимо определить соответствующие им силы. Все эти силы необходимо разбить на потенциальные и диссипативные силы. К потенциальным силам следует отнести те силы, которые определяют преобразование обратимых типов энергии. Т.е. таких типов энергий, которые могут преобразовываться в энергию движения структур. Диссипативные силы обуславливают производство энтропии. В связи с этим потребуются еще знание диссипативных потоков энергии. Так как атмосфера многокомпонентная, а состав постоянно меняется в результате фотохимических реакций, то

полное описание атмосферы потребует еще учета процессов массопереноса в результате всех фотохимических реакций.

Трансформация энергии и производство энтропии

Таким образом, неравновесные структуры систем и их динамика определяются типами энергии, как в системе, так и поступающими извне, и силами, соответствующими этим типам энергии. С хорошей степенью приближения можно считать, что неравновесность Земли поддерживается солнечной энергией, т.е. главным образом солнечная энергия определяет эволюционные процессы на Земле.

Как следует из [14-15], из-за структурированности природных объектов, все типы преобразования энергии диссипативны. На поддержание диссипативных структур идет поток солнечной радиации. Ее способность участвовать в трансформации всех энергетических процессах в атмосфере, обусловлена 20-ти кратным превосходством температуры Солнца по сравнению с температурой Земли. Именно это является основополагающим фактором существования на Земле неравновесных структур.

Землю можно условно разбить на подсистемы. К ним, в первую очередь, следует отнести мировой океан, равнинную поверхность суши, горы и атмосферу. В то же время эти подсистемы также следует представлять субсистемами. Например, в атмосфере это озонослой, ионосфера, приземный слой атмосферы.

Количество поступающей от Солнца энергии в разные подсистемы Земли различно. Ее перераспределение имеет очень сложную пространственно-временную структуру. Для атмосферы, как подсистемы Земли, эта структура определяется пространственно-неоднородным строением атмосферы. Кроме того, она определяется сезонными, суточными и другим временными вариациями.

За достаточно большой промежуток времени неравновесные структуры на Земле, включая атмосферу, можно считать стационарными. Это означает, что в течение достаточно длительного периода времени приходящий к Земле поток солнечной энергии будет компенсироваться уходящим потоком. Уходящим потоком является тепловое излучение Земли и отраженная верхней атмосферой солнечная радиация. Причем этот баланс должен выполняться для суммы всех каналов энергии. Это можно записать так:

$$\sum E_i = \sum \sigma_i^s - \sum \sigma_i^{dis} \quad (1)$$

где E_i - различные типы энергии на Земле, которые поддерживают ее динамическую неравновесную структуру; σ_i^s - приток энергии солнечной радиации, поддерживающий i -компоненту энергии; σ_i^{dis} - отток i -компоненты энергии в космос в виде электромагнитного излучения.

В общем случае при расчетах динамики любой подсистемы необходимо учитывать все типы энергии, определяющие ее динамические процессы и приходящие извне. Но поскольку есть преобладающие типы энергии, то в рамках соответствующей постановки задачи, мы можем выбрать ограниченный круг видов энергии, тем самым существенно упростив ее решение.

На первых этапах исследований атмосферу с достаточно хорошей степенью приближения можно считать стационарной неравновесной подсистемой в системе Земля. Это означает, что для атмосферы также справедливо равенство (1). Запишем его так:

$$\sum E_i^{atm} = \sum \sigma_{i_{atm}}^s - \sum \sigma_{i_{atm}}^{dis} \quad (2)$$

Здесь слева стоит энергия, которая поступает в атмосферу, а справа суммарный приток и отток энергии.

Приток энергии в атмосферу идет непосредственно за счет прямого поступления радиации от Солнца и за счет энергии, поступающей от поверхности Земли. Эта энер-

гия связана с альбедо поверхности Земли, тепловым излучением ее поверхности и нерadiационными каналами энергии, например, связанными с теплопроводностью.

Уравнение баланса для E_i^{atm} , равной соответствующей компоненте энергии отнесенной к единице массы, можно записать так:

$$\frac{\partial \rho E_i^{atm}}{\partial t} + \frac{\partial J_k^i}{\partial x_k} + \sigma_i = 0, \quad (3)$$

где J_k^i -поток i -й компоненты энергии, отнесенной к единице массы, σ_i - суммарная плотность источника и стока данного типа энергии.

Согласно (3), σ_i определяется диссипативными процессами для данного типа энергии, т.е. производством энтропии и компенсирующим это производство притоком энергии. Этот приток энергии напрямую или опосредствовано, обусловлен притоком солнечной радиации. Отсюда имеем:

$$E_0^{atm} = \int [\sum \sigma_i] dV.$$

Здесь интегрирование выполняется по всей атмосфере.

Если рассматривать достаточно длительный период времени, то атмосферу можно считать стационарной. В стационарном случае выполняется баланс приходящей и уходящей энергии, условие баланса энтропии. Кроме того, в этом случае вся поступающая в атмосферу энергия тратится только на производство энтропии.

$$dS = dS_{rad}^+ - dS_{rad}^- + dS_{atm} + dS_e, \quad (4)$$

где dS_{rad}^+ - величина энтропии, приходящая вместе с солнечной радиацией; dS_{rad}^- - уходящая в космос энтропия с потоком теплового излучения Земли; dS_{atm} , dS_e -энтропия, производимая в атмосфере и на Земле.

Необходимо иметь в виду, что уходящий от Земли поток тепла также частично трансформируется в атмосфере с дополнительным производством энтропии. Эта часть особенно велика в приземном слое атмосферы.

Уравнение для баланса энтропии в заданной точке сплошной среды на единицу массы имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho s)}{\partial t} + div J_s = \sigma_s, \quad (5)$$

где ρ -плотность, s -энтропия на единицу массы; J_s -поток энтропии; σ_s производство энтропии. Поток энтропии имеет вид:

$$J_s = \frac{Q}{T} + \rho s v - \sum \rho_k v_k \frac{\mu_k}{T},$$

а производство энтропии равно:

$$\sigma_s = Q \nabla \left(\frac{1}{T} \right) - \frac{1}{T} \Pi : \nabla v - \sum \rho_k v_k \nabla \left(\frac{\mu_k}{T} \right) - \frac{1}{T} \sum \omega_{kl} A_{kl}$$

, где Q - поток тепла, T -температура, ρ_k ,

μ_k , v_k -плотность, химический потенциал и скорость k -й компоненты газа, t – время,

Π - тензор вязких напряжений, Q –поток тепла, ω_{kl} - скорость l -той реакции k -го компонента, A_{kl} - химическое сродство,

$\Pi : \nabla v$ - скалярное произведение тензора вязких напряжений и тензора поля скоростей.

В выражении для производства энтропии первый член описывает производство энтропии в процессе теплопроводности, второй – в процессе вязкости, третий – в процессе диффузии, четвертый – в химических реакциях перехода и фазовых переходах. Эти члены записаны в общем виде, их конкретный вид различается в зависимости от степени неравновесности, например, при ламинарных и турбулентных течениях в системе.

Следует иметь в виду, что понятием энтропии можно пользоваться только вблизи равновесия, когда можно считать, что $dQ = T dS$ [19]. Это ограничение определяется соотношением $\tau_{evol} / \tau_{relax} \gg 1$, где τ_{evol} -характерное время эволюционных процессов, τ_{relax} -время установления локального равновесия. В обычных условиях это равенство хорошо выполняется в атмосфере.

Следовательно, поддержание системы в неравновесном стационарном состоянии

определяется, как балансом приходящей и уходящей энергии, так и балансом энтропии. В стационарном приближении вся солнечная энергия идет на производство энтропии, а ее прирост равен величине негэнтропии, поступающей вместе с солнечной радиацией.

Таким образом, в стационарном состоянии атмосферы энтропия является главным параметром, определяющим это состояние. Но в общем случае, когда система далека от стационарного состояния, даже если мы будем знать полное производство энтропии в каждой точке среды, этого будет недостаточно для определения состояния системы. Это обусловлено тем, что в общем случае энтропия определяет лишь ту часть энергии, которая необратимо переходит в тепло. Но в процессе изменения внешних условий, часть поступающей в систему энергии уходит также на реорганизацию старых и на создание новых структур. Поэтому для знания всех потоков энергии нужны уравнения баланса для каждого типа энергии с учетом того, что каждый тип энергии обладает и диссипативной и потенциальной составляющей. Тем не менее, знание производства энтропии в целом, в различных областях, в различные периоды времени и т.д. позволяет качественно приблизиться к эволюционной модели системы.

В настоящее время вопросы о путях трансформации солнечной энергии в различные типы энергии атмосферы изучены недостаточно. Это обусловлено их огромной сложностью. Поэтому для понимания характера трансформации энергии в реальных системах целесообразно использовать простейшие системы.

Для простейшей модели системы, состоящей из потенциально взаимодействующих МТ, количество типов энергии, определяющих ее состояние, минимально [14]. Это внутренняя энергия и энергия движения системы. Первая состоит из потенциальной и кинетической энергий МТ. Вторая, опреде-

ляющая энергию движения системы как целого, состоит из потенциальной и кинетической энергии движения системы. Эта энергия задается координатами и скоростями движения центра масс системы. Поэтому для системы МТ возможно полное описание при представлении энергии в виде внутренней энергии и энергии движения системы. Отметим, что для простейшей системы есть и еще один тип энергии. Это энергия вращения. Преобразование этого типа энергии также сопровождается диссипацией, поскольку любой тип энергии имеет обратимую и необратимую составляющие.

Но атмосфера – это далеко не совокупность систем из МТ. Ее атомарный состав весьма сложен [16]. Солнечная радиация трансформируется в энергию атмосферного газа через многочисленные энергетические каналы. Это ионизация, различные фотохимические реакции, процессы рекомбинации и т.п. Причем для различных высот атмосферы эти каналы различны. Конечной стадией преобразования солнечной энергии является тепловая и химическая энергия атмосферы. Но в любом случае, для **описания эволюции атмосферы необходимо учесть все пространственно-временные структуры каналов преобразования солнечной энергии с учетом того, что каждый из этих каналов в общем случае обладает диссипативной и потенциальной составляющими.**

Баланс всех потоков энергии в атмосфере, усредненный за достаточно большой промежуток времени, обеспечивается таким образом, что поток солнечного излучения при равновесной температуре около 6000 градусов трансформируется в уходящий из атмосферы поток, главным образом, инфракрасного излучения при температуре 300 градусов. Разность в энтропии между энтропиями приходящих и уходящих потоков энергии с хорошей точностью равна производству энтропии в атмосфере. «Остывание»

потока солнечной радиации идет последовательно через фотоионизацию, рекомбинацию, фотохимические реакции, взаимодействие с поверхностью Земли и т.д. Именно вся эта цепочка определяет существующую фотохимическую плоскостратифицированную структуру атмосферы.

Таким образом, изменение энтропии в атмосфере главным образом складывается из ее прихода вместе с солнечной радиацией, приходом от поверхности Земли, ее оттока вместе с тепловым излучением Земли в космос, производством энтропии в атмосфере. При этом значительная часть энтропии, уходящая в космос производится непосредственно на Земле, а не в атмосфере. В стационарном состоянии отношение производства энтропии на поверхности Земли к величине ее производства в атмосфере примерно равно отношению поглощаемой Землей энергии к энергии солнечной радиации и поглощаемой атмосферой поступающей энергии от поверхности Земли. Очевидно, что также относится негэнтропия, поступающая на Землю, к величине негэнтропии, поступающей в атмосферу. **Негэнтропия радиации Солнца идет на создание всех неравновесных структур на Земле, включая растительный и животный мир.**

Очевидно, что производство энтропии для разных слоев атмосферы различно. Оно пропорционально поглощаемой солнечной энергии в данном слое. Параметрами, характеризующими величину производства энтропии и, значит, величину негэнтропии, являются пространственно-временные градиенты среды. Действительно, чем больше градиенты температуры, давления, плотности, электронной концентрации и т.п., тем сильнее диссипативные процессы. Этот вывод следует из уравнения теплопроводности и уравнения для энтропии [17]. Отсюда не сложно получить оценочную формулу прироста энтропии в плоскостратифицированной стационарной атмосфере на достаточно

больших высотах, где основной приток негэнтропии обусловлен прямой солнечной радиацией, а влияние поверхности Земли пренебрежимо мало. Она имеет вид:

$$\Delta S = \sum_{l=1}^R \left\{ \frac{1}{T_{m_l}} \sum_{i=1}^{m_l} \kappa_i J_i \right\}. \quad (6)$$

Здесь ΔS - прирост энтропии, $l = 1, 2, 3 \dots R$ - число слоев разбиения атмосферы в рассматриваемой области высот, m_l - число основных линий поглощения для l -го слоя высот, T_l - средняя температура l -слоя, κ_i - усредненный коэффициент поглощения для i -й компоненты спектра солнечной радиации, J_i - интенсивность i -й компоненты спектра солнечной радиации в соответствующем слое.

Уравнение (6) позволяет оценивать производство энтропии и анализировать энергетический баланс атмосферы с учетом вариаций потоков солнечной энергии. Такие вариации связаны с суточными и сезонными изменениями потока радиации в атмосферу, а также с антропогенными и другими факторами.

Уравнения неравновесной динамики применимы для атмосферы только в том случае, если вся энергия поглощенной атмосферным газом солнечной радиации идет на увеличение энтропии [3]. Но, как уже было отмечено, это верно только вблизи стационарных состояний. Действительно, химическая энергия может накапливаться, а затем преобразовываться в любые типы энергии. Наглядным примером является процесс фотосинтеза, который приводит к накоплению энергии в древесине. Затем эта энергия может быть преобразована и в тепло и в механическую энергию. Следовательно, в периоды резких изменений солнечной радиации мы не имеем права опираться на уравнения неравновесной термодинамики. Действительно, в утренние часы, когда резко меняется приток энергии в атмосферу, значительная ее часть идет не только на нагрев, но и

запасается в виде обратимой химической энергии ионизованных атомов, а также идет на возбуждение молекул. Кроме того, в утренние часы суток меняется энергия электромагнитных полей. Чтобы все эти переходные процессы включить в описание эволюции атмосферы, необходимо существенно дополнить уравнения неравновесной термодинамики, включив в них соответствующие члены и приняв во внимание нелинейные эффекты трансформации энергии.

Трансформация солнечной радиации в атмосфере главным образом идет за счет фотохимических реакций, включая фотоионизацию. Баланс фотохимического состава записывается с помощью феноменологических самосогласованных уравнений радиации и фотохимического состава атмосферы. В общем случае эти уравнения нелинейные и многопараметрические. Поскольку они не поддаются ни численному и ни аналитическому решению, их существенно упрощают. В простейшем случае, в окрестности стационарных состояний атмосферы, уравнения для фотоионизации записывают таким образом:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \alpha_i (\rho_{0i} - \rho_i) - \beta_i \rho_i^2 = 0 \quad (7)$$

Здесь ρ_i - плотность соответствующей i -й компоненты газа, например, электроны в области ионосферы, ρ_{0i} - компонента ионизируемой составляющей газа, α_i - коэффициент, определяющий эффективность появления данной компоненты при фотоионизации, β_i - коэффициент рекомбинации.

Первый член в правой части определяет процесс фотоионизации, а второй член - процесс рекомбинации. Условие стационарности фотохимического состава атмосферы имеет вид:

$$\alpha_i (\rho_{i0} - \rho_i) = \beta_i \rho_i^2 \quad (8)$$

Отсюда при условии $\rho_{i0} \gg \rho_i$, находим: $\rho_i = \sqrt{\rho_{i0} \alpha_i / \beta_i}$.

Обычно коэффициенты α_i, β_i определяют эмпирическим путем, так как они являются очень сложными функциями состава атмосферного газа, солнечной радиации и других геофизических параметров.

Механизм взаимодействия солнечного потока радиации с атмосферным газом на микроуровне состоит в том, что энергия поглощаемого фотона идет на возбуждение молекулы и на увеличение скорости молекулы в результате так называемого Комптона эффекта. Это можно записать так:

$$E_{uf} = E_{ex} + E_{inf}, \quad (9)$$

где E_{uf} - энергия солнечного фотона, E_{ex} - энергия возбуждения молекулы, E_{inf} - энергия, переданная молекуле и определяемая законом сохранения импульса.

Отсюда следует, что энергия фотона, возбуждающего молекулу или атом, всегда должна быть больше энергии возбуждения соответствующего энергетического уровня молекулы. На самом деле уравнение баланса энергии для молекулы (8) является очень грубым. Молекула, как открытая неравновесная система также излучает и поглощает энергию. Поэтому связанные с ней физические процессы следует описывать, опираясь на два типа симметрии - внутреннюю симметрию молекулы и внешнюю пространственно-временную симметрию ее окружения. Т.е. процессы в молекуле описываются уравнением движения СЧ, а не уравнением Ньютона, которое учитывает только потенциальные взаимодействия. Пока не ясно, как учесть диссипативные процессы, обусловленные внутренней симметрией молекулы. Отсюда возникают многие проблемы описания молекулярного газа и атмосферы в целом. Поэтому на практике, как правило, необходимые значения параметров реакции берутся из опыта.

Обобщим сказанное. Открытость и неравновесность атмосферы, означает, что в ней постоянно идет процесс преобразования

всех типов энергии в тепловую энергию. Т.е. идет производство энтропии. Сохранение динамических структур происходит за счет потока солнечной радиации. Переработанная атмосферой солнечная энергия в результате ее «жизнедеятельности» выбрасывается в космос в виде равновесного электромагнитного излучения. При этом в среднем входящий в атмосферу поток энергии равен уходящему из нее потоку. Благодаря этому обеспечивается выполнение необходимого условия реализации стационарного состояния открытой неравновесной системы, которое состоит в равенстве нулю баланса всех типов потоков энергии. Т.е. стационарность неравновесного состояния поддерживается постоянными потоками энергии извне, которые компенсируют диссипативные процессы, стремящиеся установить равновесие. Для атмосферы такими условиями, прежде всего, являются потоки радиации от Солнца и тепловые потоки от поверхности Земли. Если знать, какие внешние воздействия должны быть для того или иного неравновесного состояния системы, то можно создавать системы с необходимыми свойствами.

Согласно теореме Пригожина о производстве энтропии, в стационарном состоянии неравновесной системы выполняется условие минимума производства энтропии [20]. Это условие с очевидностью выполняется для равновесных систем, в которых производство энтропии равно нулю. Выполнение этого принципа для неравновесной атмосферы обсуждалось в работах [2-4]. В них исследовались потоки энтропии в атмосфере, обусловленные переносами радиации и условием реализации минимума производства энтропии для атмосферных аттракторов. Но пока нельзя точно сказать, что здесь существует полная ясность.

Таким образом, для **стационарности состояний необходимыми условиями являются: баланс полного потока энергии и вещества, баланс притоков для свободной**

энергии, баланс производства энтропии, ее ухода и поступления с радиацией. Знание устойчивости стационарного состояния атмосферы очень важно для понимания роли антропогенных выбросов в изменении состояния атмосферы и в формировании климата. В частности, без них трудно понять, как влияют выбросы двуокиси углерода и метана на радиационный баланс атмосферы.

Заключение

Состояние неравновесных систем определяется внешними факторами. Для атмосферы основным таким фактором является солнечная радиация. Характер воздействия внешних факторов на атмосферу, прежде всего, определяется ее составом и механизмами взаимодействия солнечной радиации с компонентами атмосферного газа. При изменениях состава атмосферы, меняется и характер воздействия на нее радиации. Например, увеличение двуокиси углерода приводит к парниковому эффекту и к соответствующему изменению потока солнечной радиации на Землю. Т.е. неравновесные системы характеризуются нелинейностью и обратной связью.

Диссипативность процессов возникновения и эволюции структур атмосферы требует учета производства энтропии при построении ее эволюционной модели. Причем нужно знать производство энтропии для каждой ее компоненты химического состава с учетом зависимости его концентрации, как от солнечной радиации, так и от зависящего от времени состава атмосферы.

Наиболее подходящим современным физическим аппаратом, применимым для изучения эволюции системы является неравновесная термодинамика. Но он нуждается в дополнении. Во-первых, систему уравнений неравновесной термодинамики необходимо дополнить уравнениями, определяющими влияние внешних факторов. В частности, для атмосферы нужно задать приток солнечной

радиации с учетом его зависимости от ее состояния. Так, например, парниковый эффект не только приводит к нагреву поверхности Земли, но и к уменьшению поступающей на Землю энергии солнечной радиации. Кроме того, необходимо учесть, что уравнения притока энергии для разных высот атмосферы и для каждой компоненты атмосферного газа различны. В общем случае они должны включать в себя члены, определяющие производство энтропии, связанное с солнечной радиацией и изменением состава атмосферы.

Во-вторых, вдали от стационарных состояний атмосферы, например, в утренние и вечерние часы суток, уравнения баланса приходящих в атмосферу энергии и энтропии не выполняются. В частности, утром энергия солнечной радиации идет на структурные изменения в ионосфере, на изменение химического состава атмосферы при фотохимических реакциях. В утренние часы энергия атмосферы увеличивается, а в вечерние - уменьшается. И только в приближении стационарности состояния атмосферы, когда приток энергии равняется ее оттоку, можно считать, что весь поток солнечной энергии равен энергии диссипации, т.е. вся поступающая на Землю солнечная энергия идет на компенсацию производства энтропии. Только в этом приближении справедливы уравнения неравновесной термодинамики.

В-третьих, для построения прогностической модели атмосферы необходимо решение вопросов об устойчивости ее тех или

иных состояний в зависимости от изменения внешних параметров. Так, количество поглощаемой солнечной энергии атмосферой определяется не только солнечной активностью, но и состоянием среды между Землей и Солнцем; граничными условиями на поверхности Земли; антропогенными факторами и др. Необходимо изучить типы неустойчивостей в системе газ-радиация, их механизмы и характер поведения в зависимости от изменений внешних ограничений. Требуется изучение точек бифуркации атмосферы.

Значительные проблемы при построении эволюционной модели атмосферы связаны с тем, что пока нет строгой физической теории для системы газ-радиация. Есть только термодинамика газа, есть термодинамика теплового равновесного излучения. Более того, не ясно, как система радиация-газ ведет себя в неравновесных состояниях.

Таким образом, без знания основных законов и принципов эволюции открытых систем, без понимания того, как на основе свойств структурных элементов системы определять свойства самой системы при существующих внешних ограничениях, невозможно понять такую сложную систему, как атмосфера Земли. В целом, решение физических задач, связанных с созданием эволюционной модели атмосферы при условии изменения внешних и внутренних факторов, упирается в необходимость развития нового направления - физики эволюции открытых систем.

Литература: [1]. *Fronal C.* Heart and Gravitation.1//The action principal. arXiv60812. 4990v1 [physics.gen-ph] 30 Dec 2008; [2] *Essex C.* Radiation and Irreversible Thermodynamics of Climate Journal of the atmospheric Science//1984 V.41.№ 12 pp. 1985-1991; [3] *Изаков М.Н.* Самоорганизация и информация на планетах и в экосистемах. УФН. 1997, Т 167, № 10, с. 1087-1094; [4] *Голицын Г.С., Мохов И.И.* Об устойчивости и экстремальных свойствах моделей климата// Физика атмосферы и океана. 1978, Т.14, № 4, с. 378-387; [5] *Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И.* Радиационный баланс атмосферы и климатические проявления солнечной переменности// Оптика атмосферы и океана. 2004, 17. № 12, с. 1003-1017; [6] *Сомсиков В.М., Дунгенбаева К.Е., Гангули Б.* Акустико-гравитационные волны в неравновесной атмосфере// Геомагнетизм и аэрономия 2004, Т 4. N3, с.407-411; [7]. *Antonova V.P., Dungenbaeva K.E, Zalizovskii A.V., Inchin A.S., Kryukov S.V., Somsikov V.M, Yampol'skii Yu. M.* Difference between the spectra of Acoustic Gravity Waves in Daytime and Nighttime Hours due to Nonequilibrium Effects in the atmosphere// Geomagnetism and Aeronomy, 2006, Vol. 46, No 1, pp. 101-109; [8]. *Климонтович Ю.Л.* Статистическая теория открытых систем. Москва, Янус. 1995 622 с; [9] *Ebeling W., Feistel R.* Chaos and Cosmos. Prinzipien der Evolution.

Spectrum, Heidelberg Berlin Oxford, 1984; [10] *Planck M.* Heart radiation. Translation of 2nd republished 1959. Dover. 224 pp.; [11] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Статистическая физика. Ч. 1. М. Наука, 1976; [12] *Сомсиков В.М.* Необратимость в проблеме взаимосвязи физических законов систем с физическими законами их элементов// ПЭОС. В.10, Т.2, 2008, С.8-21; [13] *Somsikov V.M.* The equilibration of an hard-disks system// International. Journal. Bifurcation And Chaos, V 14, N11, 2004, p. 4027-4033, [14] *Сомсиков В.М.* Что дает решение проблемы необратимости. ПЭОС. 2009. В.11, Т.1, с.4-20; [15] *Somsikov V.M.* About development of the new approach to the analysis of nonequilibrium systems. Eurasian Physical Technical. V.4 No.1(7), 2007, p.40-51; [16] Справочник по геофизике. М.: Наука, 1965. 571с.; [17] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М. Наука, 1986; [18] *Somsikov V.M.* Thermodynamics and classical mechanics//Journal of physics: Conference series. 23. 2005, p.7-16; [19]. *Rumer Yu.B., Ruykin M. Sh.* Thermodynamics. Stat. Physics and Kinematics. М., 1977; [20] *Николис Г., Пригожин И.* Познание сложного. М, Мир, 1990. 342 с; [21] *В.М. Сомсиков.* К началам физики эволюции. Журнал ПЭОС. Вып. 8, Т. 2, 2006, стр. 29-39; [22] *Козырев Н.А.* Избранные труды. Л.: Изд-во ЛГУ, 1991 – 447 с.; [23] *Еганова И.А.* Природа пространства-времени. Новосибирск: Изд-во СОРАН, филиал “Гео”, 2005–271 с.;

Принято в печать 16.07.09

УДК 530.1 (075.8)

**ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ НЕРАВНОВЕСНОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ,
КАК ОТКРЫТОЙ СИСТЕМЫ**

Вячеслав Михайлович Сомсиков

*Республика Казахстан, г. Алма-Ата, 480020, Институт ионосферы, Алма-Ата
E-mail: vmsoms@rambler.ru*

**АТМОСФЕРАНЫҢ МОДЕЛІН ТЕПЕ-ТЕҢСІЗ АШЫҚ ЖҮЙЕ РЕТІНДЕ ҚҰРАСТЫРУ БАРЫСЫНДА
ТУЫНДАЙТЫН МӘСЕЛЕЛЕР**

В.М.Сомсиков

Ионосфера институты, Алматы, Қазақстан

Атмосфераның моделін тепе-теңсіз ашық жүйе ретінде құрастыру барысында математика және физика тұрғысынан туындайтын мәселелер талқыланып, проблеманы шешу жолдары қарастырылады. Кейбір принциптері де анықталған.

**PROBLEMS OF CONSTRUCTION OF NONEQUILIBRIUM MODEL
OF ATMOSPHERE AS OPEN SYSTEM**

Vyacheslav Mihajlovich Somsikov

*Republic Kazakhstan, Alma-Ata, 480020, Institute of ionosphere, Alma-Ata
E-mail: vmsoms@rambler.ru*

Mathematical and physical problems and ways of construction of theoretical nonequilibrium model of atmosphere, as open system are discussed. Some principles of its creation are determined.