

Энтропийные метрики экстремальных геофизических явлений для диагностики и геопроектирования

В.А. Головко

*ФГБУ Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»,
E-mail: golovko@planet.iitp.ru*

Рассматриваются концепция и соответствующие принципы энтропийных метрик применительно к оценке эффекта потоков отрицательной энтропии при самоорганизации атмосферных систем. Обсуждаются также принципы неравновесной термодинамики и их возможные приложения к геокосмической физике. Анализируются результаты использования спутниковых измерений с высоким спектральным разрешением характеристик приходящего солнечного излучения в ходе эксперимента SORCE для вычисления спектрального состава падающего на верхнюю границу атмосферы Земли потока энтропии. Приводится обзор будущей космической системы CLARREO, предназначенной для длительных высокоточных наблюдений за критически важными изменениями радиационных воздействий в климатической системе Земли. Приводится анализ потоков отрицательной энтропии в область тропических циклонов (ТЦ) по данным спутниковых наблюдений, который позволяет прояснить механизмы, ответственные за эволюцию ТЦ, а также обосновать новые подходы к прогнозу их интенсивности.

Ключевые слова: неравновесная термодинамика, поток энтропии, аномалии геофизических полей, тропические циклоны, диагностика атмосферных катастроф

Введение

Самыми смертоносными и разрушительными на Земле являются два природных явления: катастрофические землетрясения и мощные тропические циклоны (ТЦ). В последние годы ведется активный поиск новых более совершенных технологий космического мониторинга предвестников этих стихийных бедствий. Аномалии характеристик уходящей длинноволновой радиации (УДР), детектируемые по наблюдениям из космоса, являются важнейшим индикатором многих скрытых процессов, протекающих в преддверии проявления большинства стихийных бедствий. Особый интерес в области инновационных подходов к решению данной проблемы представляет использование общих принципов современной нелинейной неравновесной термодинамики, включающей описание необратимых диссипативных процессов.

Многие важные процессы в системе поверхность-атмосфера Земли трудно идентифицируются на основе анализа только сравнительно малых аномалий энергетических потоков. Поэтому диагностика потоков энтропии, являющейся основным инструментом неравновесной термодинамики, позволяющим анализировать характеристики локального перераспределения меры «порядок/хаос», является ценным информационным ресурсом. В ряде случаев дополнительные энтропийные метрики оказываются более чувствительными по отношению к предвестникам стихийных бедствий, чем обычные энергетические характеристики. При этом следует различать характеристики потоков энтропии разных источников. Наибольший практический интерес представляют потоки энтропии в атмосфере, которые тесно, но не прямо, связаны с потоками энтропии, порождаемыми радиационным полем Земли. Потоки энтропии в атмосфере на практике бывает трудно восстановить с необходимой точностью, в то время как потоки уходящей радиации в настоящее время измеряются с достаточно высокой точностью, но при этом значительно сложнее интерпретируются.

Потоки энтропии в атмосфере Земли

Прошло уже достаточно много времени с момента публикации основополагающих статей (*Paltridge, 1975; Peixoto et al., 1991; Goody, Abdou, 1996*), послужившими стимулом исследовательского интереса к энтропии атмосферы и энтропии, порожденной ра-

диационным полем Земли в частности, но это направление и сейчас продолжает интенсивно развиваться. Мониторинг изменений энтропии атмосферы базируется на анализе баланса потоков энтропии разных источников. Поток энтропии является ключевым понятием неравновесной термодинамики подобно самой энтропии в классической термодинамике и статистической физике. Согласно второму закону термодинамики изолированная система эволюционирует к равновесию с максимальной энтропией, при котором «порядок» в системе минимален. Возможность приведения открытой системы к состоянию далекому от равновесия, т.е. к самоорганизации посредством потоков отрицательной энтропии (негэнтропии) из окружающей среды была подтверждена для широкого круга явлений: от физико-химических процессов до процессов поддержания жизнедеятельности.

При обобщении классической термодинамики на неравновесные процессы исходят из представления о локальном равновесии. Известно, что время релаксации растет с увеличением размеров системы, так что отдельные макроскопически малые части системы приходят сами по себе в равновесное состояние значительно раньше, чем устанавливается равновесие между этими частями. Поэтому в неравновесной термодинамике принимают, что хотя в целом состояние системы неравновесно, отдельные ее малые части равновесны (точнее, квазиравновесны), но имеют термодинамические параметры, медленно изменяющиеся во времени и от точки к точке (Базаров, 1991). Свойства неравновесной системы при этом определяются локальными термодинамическими потенциалами, которые зависят от пространственных координат и времени только через характеристические термодинамические параметры, для которых справедливы уравнения термодинамики.

Кратко рассмотрим основные определения и выражения (1-4) неравновесной термодинамики (Базаров, 1991). Так, если в качестве характеристических переменных выбраны локальная плотность внутренней энергии U , удельный объем α (или локальная плотность массы среды ρ) и локальные концентрации различных компонентов N_k , то состояние физически элементарного объема в окрестности заданной точки и в заданный момент времени описывается локальной энтропией s , определяемой уравнением Гиббса:

$$ds = \frac{1}{T} dU + \frac{p}{T} d\alpha - \sum_k \frac{\mu_k}{T} dN_k, \quad (1)$$

где p -давление, T -температура, $N_k = \frac{\rho_k}{\rho}$ и $\rho = \sum_k \rho_k$. В (1) α - удельный объем, μ_k — химический потенциал, ρ_k плотность - k -ой компоненты, ρ - полная плотность.

Так как локальная энтропия s (единицы массы) или произведение ρs (локальной энтропии единицы объема) зависит от термодинамических параметров a_k так же, как и при полном равновесии, то при необратимом процессе в адиабатической системе скорость возникновения энтропии в единице объема (производство энтропии) равна

$$\sigma = \frac{d(\rho s)}{dt} = \sum_k \frac{\partial(\rho s)}{\partial a_k} \frac{da_k}{dt}, \quad (2)$$

Рассматривая увеличение энтропии при изменении локальных макроскопических параметров a_k в адиабатных условиях как «причину» необратимого процесса, величины

$\frac{\partial(\rho s)}{\partial a_k} \equiv X_k$ определяют *термодинамические силы*, а величины $\frac{da_k}{dt} \equiv I_k$, представляющие

скорость изменения параметров – термодинамические потоки. Выражение (2) для производства энтропии можно записать в виде

$$\sigma = \sum_k I_k X_k, \quad (3)$$

Энтропия всей неравновесной системы аддитивно складывается из энтропий ее отдельных частей:

$$S = \int_V \rho s dv. \quad (4)$$

Заметим, что производные в правой части (1) могут быть получены в каждом конкретном случае из первого закона термодинамики, уравнения непрерывности и уравнения материального баланса.

Законы термодинамики универсальны в том отношении, что применимы к системам из большого числа частиц любой природы, т.е. как к классическим, так и к квантовым системам, как к веществу, так и к полю, прежде всего, к электромагнитному полю – излучению, представляющему собой также корпускулярную систему (Базаров, 1991).

Потоки радиационной энтропии

Взаимосвязь между спектральной интенсивностью излучения E_λ [Вт·м⁻²·мкм⁻¹·ср⁻¹] и спектральной интенсивностью радиационной энтропии L_λ [Вт·К⁻¹·м⁻²·мкм⁻¹·ср⁻¹] может быть представлена выражениями Планка в приближении монохроматического излучения абсолютно черного тела (Goody, Abdou, 1996):

$$E_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} x, \quad x = [\exp (hc / \lambda kT) - 1]^{-1} \quad (5)$$

$$L_\lambda = \frac{2kc}{\lambda^4} [(1+x) \ln(1+x) - x \ln x], \quad (6)$$

где x — средняя населенность фотонов в состоянии равновесия, λ - длина волны, h , c , и k – постоянная Планка, скорость света и постоянная Больцмана соответственно, T – равновесная температура черного тела.

Падающий на Землю от Солнца поток радиационной энтропии J может быть вычислен путем интегрирования выражения (6) по всему диапазону длин волн λ в пределах телесного угла Ω при известном зенитном угле θ .

$$J = \int_0^\infty d\lambda \int_\Omega L_\lambda \cos \theta d\Omega \quad (7)$$

Согласно приближению, предложенному в (Stephens, O'Brien, 1993), оценить J можно с помощью радиационной модели Солнца в виде поля излучения черного тела (ЧТ) с некоторой эффективной температурой T_s .

$$J_{SW}^{(in)} = \frac{4}{3} \sigma T_s^3 \frac{\int_{\Omega_0} \cos \theta d\Omega}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta} = \frac{4}{3} \sigma T_s^3 \cos \theta_0 \frac{\Omega_0}{\pi}, \quad (8)$$

где σ - постоянная Стефана-Больцмана, θ_0 -солнечный зенитный угол и Ω_0 - телесный угол. Подставляя $T_s = 5770K$, $\cos \theta_0 = 0.25$ и $\Omega_0 = 6.77 \cdot 10^{-5}$ ср, получим для планетарного потока энтропии падающей коротковолновой солнечной радиации $J_{SW}^{(in)} = 0.08$ Вт·м⁻²·К⁻¹.

Рассматривая нашу планету Земля, как идеализированное сферическое «серое тело», находящееся в локальном радиационном равновесии, можно аналогичным образом получить и оценки баланса потоков радиационной энтропии. Считая, что отражение солнечного излучения является Ламбертовым и, принимая планетарное альbedo Земли α_p равным 0.3,

получим оценку $J_{SW}^{(out)}$ согласно (Wu, Liu, 2010)

$$J_{SW}^{(out)} = \int_0^{\infty} \frac{2\kappa C}{\lambda^4} \left\{ (1 + \delta_0 x^s) \ln(1 + \delta_0 x^s) - \delta_0 x^s \ln(\delta_0 x^s) \right\} d\lambda, \quad (9)$$

где $\delta_0 = \alpha_p \cos \theta_0 \Omega_0 / \pi$, а x^s определяется (5) при $T=T_s$. После подстановки в (9) соответствующих значений, получим величину $J_{SW}^{(out)} = 0.11 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$.

Планетарный поток энтропии, соответствующий УДР, может быть вычислен на основе выражения, аналогичного (9)

$$J_{LW}^{(out)} = \int_0^{\infty} \frac{2\kappa C}{\lambda^4} \left\{ (1 + \varepsilon_p x^p) \ln(1 + \varepsilon_p x^p) - \varepsilon_p x^p \ln(\varepsilon_p x^p) \right\} d\lambda, \quad (10)$$

где ε_p - излучательная способность планеты и E_p^p определяется (5) при $T=T_p$. Здесь T_p «излучательная» температура планеты, которая может быть оценена из условия локального радиационного баланса, а именно, что УДР равняется поглощенной коротковолновой радиации (ПКР): $\pi R^2 Q_0 (1 - \alpha_p) = 4\pi R^2 \varepsilon_p \sigma T_p^4$, где Q_0 - солнечная постоянная ($Q_0 = 1361 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$), R - радиус Земли. После подстановки в (10) соответствующих значений, получим оценку $J_{LW}^{(out)} = 1.24 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$.

Имея численные значения трех составляющих ($J_{SW}^{(in)}$, $J_{SW}^{(out)}$ и $J_{LW}^{(out)}$) можно оценить баланс потоков радиационной энтропии с окружающим космическим пространством. Этот баланс J_p , отражающий результирующее производство энтропии планетой Земля, можно представить выражением

$$J_p = J_{LW}^{(out)} + J_{SW}^{(out)} - J_{SW}^{(in)}$$

Полученные численные оценки составляющих баланса показывают, что сумма уходящих потоков ($J_{LW}^{(out)} + J_{SW}^{(out)}$) многократно превосходит входящий поток ($J_{SW}^{(in)}$) и определяющий вклад в производство радиационной энтропии Земли вносит $J_{LW}^{(out)}$.

Особенности спектральной зависимости потоков радиационной энтропии

Отметим, что все приведенные выше оценки потоков энтропии, были получены на основе традиционного теоретического подхода. Однако в настоящее время ситуация кардинально изменилась и стали доступны результаты прямых измерений спектральных характеристик солнечного излучения с помощью аппаратуры Spectral Irradiance Monitor (SIM) в рамках эксперимента Solar Stellar Irradiance Comparison Experiment (SOLSTICE) на спутнике SORCE (<http://lasp.colorado.edu/sorce/>). Результаты регулярных измерений солнечного спектра аппаратурой SIM, начиная с апреля 2004 г. по настоящее время, позволяют констатировать, согласно данным, приведенным на рис. 1, адаптированного из (Wu, et al., 2011), заметное спектральное перераспределение солнечного излучения: уменьшение в ультрафиолетовой и увеличение в видимой и ближней ИК областях.

Это очень важный результат, поскольку термическая структура и композиционный состав атмосферы Земли фундаментальным образом определяются спектральным составом приходящего солнечного излучения и последующей трансформацией потоков радиации и энтропии в ней. Радиация в ультрафиолетовой области спектра инициирует цепочки химических реакций, в частности, определяющих характеристики стратосферного озона, и, таким образом, влияющих на основной источник нагрева средней атмосферы. Радиация в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах в основном достигает и нагревает нижнюю стратосферу и поверхность Земли. Вариации спектрального состава солнечного излучения существенно влияют на динамику атмосферы и в конечном итоге на климат.

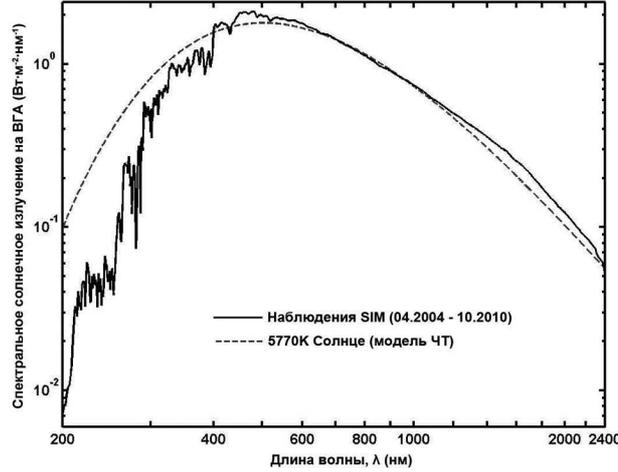


Рис. 1. Спектр солнечного излучения на верхней границе атмосферы по результатам измерений SIM (сплошная) и по данным модели черного тела (штриховая)

Эмпирическая оценка потока солнечной радиационной энтропии на Землю в диапазоне 200-2400 нм по данным SIM составляет $1.13 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$. При этом экстраполированная оценка для полного падающего на Землю потока радиационной энтропии во всем спектральном диапазоне $[0-\infty]$ составляет $1.24 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$ (Wu, et al., 2011), что при глобальном усреднении (с учетом фактора $1/4$) дает $J_{SW}^{(in)} = 0.31 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$. Заметим, что эта оценка почти в четыре раза превосходит значение ($J_{SW}^{(in)} = 0.08 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$), полученное с использованием интегрального теоретического (Stephens, O'Brien, 1993; Wu, Liu, 2010) выражения (8) в предположении радиационной модели Солнца в виде поля излучения ЧТ.

Важной причиной дополнительных расхождений может быть также неучет изменения спектрального состава солнечного потока радиационной энтропии в зависимости от расстояния до источника (Солнца). Действительно, по мере удаления от Солнца на расстояние r спектральные потоки радиационной энергии, задаваемые равенством (5), убывают обратно пропорционально квадрату расстояния r , т.е.

$$E_{\lambda}^r = \frac{r_S^2}{r^2} E_{\lambda}^S \quad \text{или} \quad \frac{E_{\lambda}^r}{E_{\lambda}^S} = \frac{r_S^2}{r^2}, \quad (11)$$

где r_S - радиус Солнца. Здесь верхний индекс s указывает на потоки у поверхности Солнца, а r у поверхности Земли, т.е. на расстоянии r от Солнца. Равенство (11) отражает факт независимости отношения $E_{\lambda}^r / E_{\lambda}^S$ от длины волны λ при изменении расстояния r .

Однако, согласно (6), для отношения $L_{\lambda}^r / L_{\lambda}^S$ получим

$$\frac{L_{\lambda}^r}{L_{\lambda}^S} = \frac{\left(1 + \frac{r_S^2}{r^2} x^s\right) \ln\left(1 + \frac{r_S^2}{r^2} x^s\right) - \left(\frac{r_S^2}{r^2} x^s\right) \ln\left(\frac{r_S^2}{r^2} x^s\right)}{(1 + x^s) \ln(1 + x^s) - (x^s) \ln(x^s)}. \quad (12)$$

Равенство (12) показывает, что в отличие от отношения $E_{\lambda}^r / E_{\lambda}^S$ отношение $L_{\lambda}^r / L_{\lambda}^S$ зависит не только от r , но и от длины волны λ .

Данные, приведенные на рис.2, иллюстрируют зависимость отношений $E_{\lambda}^r / E_{\lambda}^S$ и $L_{\lambda}^r / L_{\lambda}^S$ от длины волны λ на расстоянии $r=1$ а.е., т.е. на расстоянии от Солнца до Земли (Wu, et al., 2011). Факт зависимости спектральных энтропийных потоков при изменении расстояния Земли до Солнца предполагает пересмотр соотношения полученных ранее статических оценок составляющих баланса потоков энтропии для планеты Земля. Поэтому важным следствием экспериментального доказательства перераспределения солнечного спектра,

приводящим к изменениям спектральных величин потоков радиационной энтропии, может являться пока не изученный скрытый механизм изменений в климатической системе Земли и его потенциальная связь с интенсификацией аномальных природных явлений.

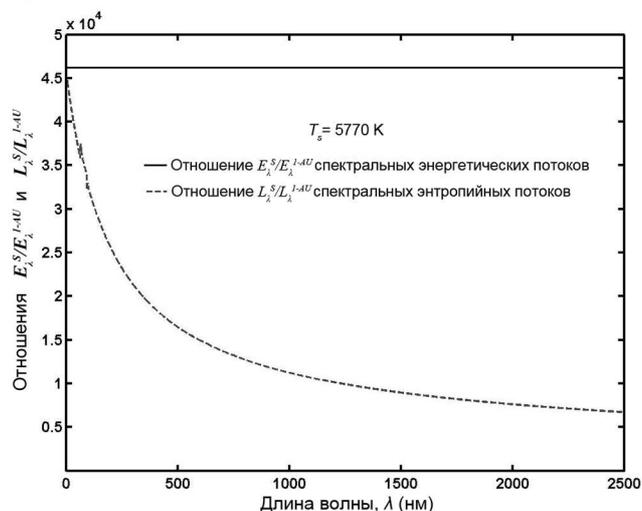


Рис. 2. Отношение спектральных энергетических потоков (сплошная) и спектральных энтропийных потоков (штриховая) на поверхности Солнца и на расстоянии 1 а.е. (т.е. на расстоянии Земли от Солнца)

Знание спектрального состава падающего солнечного излучения открывает принципиально новые информационные возможности исследования земных процессов. Однако для полного анализа спектральных энергетических и энтропийных потоков требуется регистрация с помощью космических средств наблюдений спектральных зависимостей отраженного коротковолнового и уходящего длинноволнового излучений, трансформированных системой поверхность-атмосфера Земли. Эту революционную задачу призван решить космический проект CLARREO (Climate Absolute Radiance and Refractivity Observatory). Более подробную информацию об CLARREO можно получить на главной интернет-странице этого проекта по адресу: <http://clarreo.larc.nasa.gov>. В ходе этого проекта, который запланирован на 2018-2020 гг., кроме регистрации полной квазинепрерывной спектральной зависимости излучения на ВГА, предполагается реализовать и беспрецедентно высокую точность абсолютных измерений, полностью удовлетворяющую требованиям адекватного исследования радиационного баланса и климата Земли.

Перспективная система спектральных радиационных измерений

Анализ современных требований, предъявляемых к перспективным системам космического мониторинга характеристик радиационного поля Земли, привел к заключению о необходимости создания принципиально нового поколения измерительных приборов, которые придут на смену оперативной системе CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System). Разработка и запуск космической обсерватории CLARREO (Climate Absolute Radiance and Refractivity Observatory), которая будет интегрировать систему новейших измерительных приборов, в 2007 г. были объявлены одной из четырех наиболее приоритетных космических миссий ближайшего десятилетия. Беспрецедентно высокая точность и стабильность измерений CLARREO позволят в значительной степени решить важнейшие задачи диагностики всех составляющих системы «поверхность-атмосфера» Земли. Главная особенность новейшей системы состоит в переходе от использования радиометров к гиперспектрометрам в

качестве основных измерительных приборов. Космическая группировка CLARREO начнет формироваться в июле 2018 г. запуском двух сегментов IR/RO (CLARREO-1) с помощью одной ракеты-носителя.

На борту CLARREO-1 будет установлено два прибора (<http://clarreo.larc.nasa.gov>): 1. Infrared (IR) Instrument (ИК-гиперспектрометр); 2. Global Navigation Satellite System-Radio Occultation/GNSS-RO (Система радиопросвечивания). Основные характеристики ИК-спектрометра, построенного на принципах фурье-спектрометрии, следующие: систематическая погрешность менее 0.1К; спектральный диапазон 200-2000 см⁻¹ (5 - 50 мкм); Спектральное разрешение 0.5 см⁻¹; пространственное разрешение 25 км.

Измерения с помощью аппаратуры установленной на сегментах IR/RO позволят восстанавливать значения практически всех наиболее важных геофизических параметров окружающей среды. Высокая эффективность перехода от одиночных КА к космическим группировкам была первоначально доказана ещё на примере спутниковой системы «А-поезда» и сейчас это становится основным системным подходом. С целью завершения формирования системы наблюдений CLARREO в состав космической группировки в мае 2020 г. будет введено два дополнительных сегмента RS (CLARREO-2) с помощью также одной ракеты-носителя. На борту CLARREO-2 будет установлен прибор Reflected Solar (RS) Instrument (Спектрометр солнечного отраженного излучения). Основные характеристики спектрометра следующие: систематическая погрешность менее 0.3%; квазинепрерывный спектральный диапазон 320-2300 нм; спектральное разрешение 4-8 нм; пространственное разрешение 0.5 км.

Важной отличительной особенностью обсерватории CLARREO, включающей четыре КА, движущихся друг за другом по одной и той же орбите (см. рис. 3) является возможность взаимной калибровки с широкополосной аппаратурой CERES, а также с оперативными зондирующими системами (CrIS, IASI), видеоспектрометрами, такими как VIIRS, аппаратурой геостационарных систем и т.д.

Переход от радиометрических измерений характеристик поля излучения к гиперспектральным позволяет реализовать принципиально новый подход к мониторингу аномальных природных и антропогенных явлений. Это в полной мере относится и к мониторингу предвестников природных катастроф.

Анализ потоков энтропии в атмосферных вихрях

До введения в строй космической группировки CLARREO прямое восстановление потоков энтропии в атмосфере с необходимой точностью по данным спутниковых радиационных измерений весьма затруднительно. Поэтому основной подход к оценке потоков энтропии, который может быть реализован в настоящее время, базируется на использовании результатов восстановления всего набора необходимых геофизических параметров, полученных по данным решения обратных задач применительно к радиационным космическим наблюдениям. Следует заметить, что процесс возрастания энтропии, соответствующий увеличению фактора неупорядоченности в сложной климатической системе в целом, не является монотонным в отдельных частях этой системы. Наблюдения показывают, что рост энтропии системы в целом сопровождается достаточно регулярными проявлениями формирования упорядоченных структур, которые сопровождаются соответствующим уменьшением локальных значений энтропии. Таким образом, одновременно с «деградацией» упорядоченной солнечной энергии, в системе «Солнце–атмосфера–Земля» идут процессы самоорганизации и усложнения структур окружающей нас Природы. Одним из ярких примеров проявлений такой самоорганизации и являются мощные атмосферные вихревые образования – тропические циклоны (Головка, 2006; Головка, Кондранин, 2011).

Для того чтобы качественные рассуждения о процессах перехода от хаоса к порядку облечь в более строгую форму, продолжим рассмотрение использования общих принципов современной неравновесной термодинамики, начатое в первом разделе статьи. Локальное возникновение порядка из хаоса (примером которого является ТЦ) отнюдь не противоречит второму закону термодинамики и может быть достаточно эффективно рассмотрено в рамках расширенной версии теории.

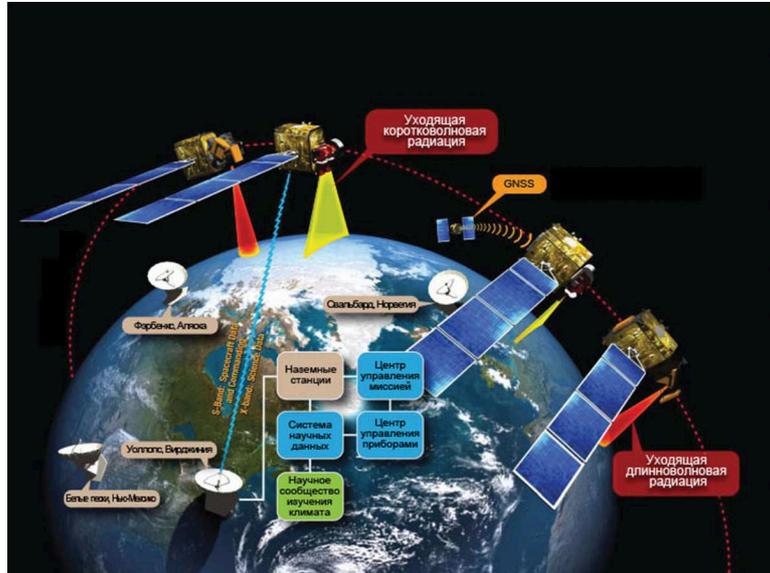


Рис. 3. Базовая концепция миссии CLARREO

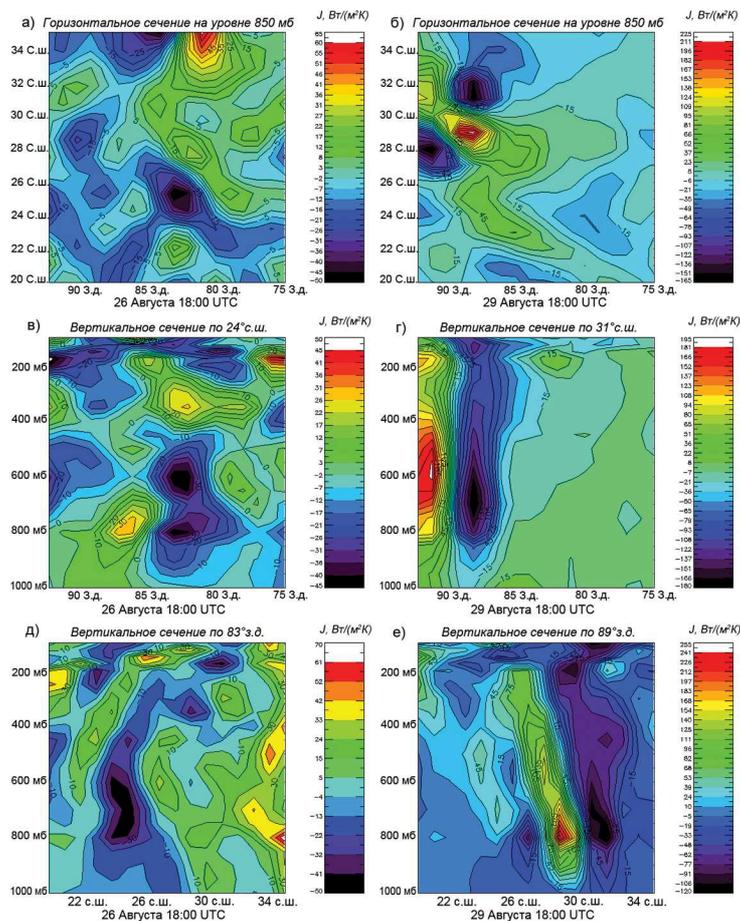


Рис. 4. Горизонтальные (а, б) и вертикальные (в, г, д, е) сечения полей потока энтропии в область урагана Катрина 26 и 29 августа 2005 г.

Уравнение Гиббса (1) может быть записано в терминах изменения энтропии на единицу массы:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T} \frac{dU}{dt} + \frac{p}{T} \frac{d\alpha}{dt} - \sum_k \frac{\mu_k}{T} \frac{dN_k}{dt}, \quad (13)$$

Производные в правой части (13) могут быть получены из первого закона термодинамики, уравнения непрерывности и уравнения материального баланса.

Из первого закона термодинамики следует:

$$\frac{dU}{dt} = -\alpha \operatorname{div} \bar{J}_k - p \frac{d\alpha}{dt}, \quad (14)$$

где \bar{J}_k - вектор диффузного потока, $\alpha = \rho^{-1}$. Для замыкания уравнения (14) используются уравнение непрерывности:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \alpha \operatorname{div} \bar{V} \quad (15)$$

и уравнения материального баланса

$$\frac{dN_k}{dt} = -\alpha \operatorname{div} J_k + \alpha \sum_r v_{kr} m_k \omega_r \quad (16)$$

Здесь $\bar{V} = \sum \rho_k \frac{\bar{V}_k}{\rho}$ — вектор полной скорости, \bar{V}_k - вектор скорости k -ой компоненты, v_{kr} - r -ый метрический коэффициент химической реакции для k -ой компоненты, m_k - относительная молекулярная масса k -ой компоненты, а ω_r - скорость r -ой химической реакции. При необратимом процессе в адиабатной системе скорость возникновения энтропии в единице объема равна:

$$\frac{\partial \rho s}{\partial t} = -\operatorname{div}(\rho s \bar{V} + \frac{1}{T} \bar{J}_q - \sum_k \frac{\mu_k}{T} \bar{J}_k) + \sigma, \quad (17)$$

где

$$\sigma = -\sum_k \bar{J}_k \nabla \frac{\mu_k}{T} + \frac{1}{T} \sum_k \bar{J}_k F_k - \frac{1}{T} \sum_r \sum_k v_{kr} \mu_k \omega_r \quad (18)$$

Обычно, в атмосфере вклад $\frac{1}{T} \bar{J}_q$ пренебрежимо мал по сравнению с $\rho s \bar{V}$. При оценке диффузного потока J_k для k -ой компоненты, который определяется как $\bar{J}_k = \rho_k (\bar{V}_k - \bar{V})$, можно пренебречь содержанием жидкой воды (даже для условий влажной тропической атмосферы) по сравнению с концентрациями водяного пара и сухого воздуха. Обычно в такой двухкомпонентной смеси скорости диффузии для водяного пара и сухого воздуха полагаются практически равными. Поэтому, в этом случае $\bar{J}_k \approx 0$.

Таким образом, выражение для полной энтропии s на единицу массы, состоящей из энтропии s_q для водяного пара и s_d - для сухого воздуха можно записать в виде (Liu Y., Liu C. 2008):

$$s = s_q + s_d = q(C_{pv} \ln T - R_v \ln e) + (1-q)[C_{pd} \ln T - R_d \ln(p-e)] \quad (19)$$

где q - удельная влажность, C_{pv} - удельная теплоемкость при постоянном давлении для пара, R_v - газовая постоянная для пара, e - давление пара, C_{pd} - удельная теплоемкость при постоянном давлении для сухого воздуха, R_d - газовая постоянная для сухого воздуха.

Для вычисления s , согласно (19), необходимо задание всех термодинамических параметров, входящих в это выражение, на 3D-сетке. Стандартная процедура расчета потоков энтропии для декартовых координат в нашем случае не совсем удобна, поскольку данные в климатических базах, (например, «NCEP/NCAR reanalysis»), как правило, приведены для

уровней постоянного давления, поэтому необходимо преобразовать выражение для потока энтропии из координат по высоте z в координаты по давлению p :

$$\begin{aligned}
 -\operatorname{div} \overline{J_s} = & -\frac{\partial \rho s u}{\partial x} - \frac{\partial \rho s v}{\partial y} - \rho \frac{\partial \rho s u}{\partial p} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \rho \frac{\partial \rho s v}{\partial p} \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right) - \rho \frac{\partial s \omega}{\partial p} + \\
 & + \frac{\tilde{\lambda} \rho}{T} \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + 2 \rho \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial^2 T}{\partial p \partial x} + 2 \rho \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial^2 T}{\partial p \partial y} + \rho^2 \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 T}{\partial p^2} + \right. \\
 & + \rho \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \rho \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial^2 \phi}{\partial p \partial x} + \rho \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial^2 \phi}{\partial p \partial y} \right) \frac{\partial T}{\partial p} + \rho^2 g^2 \frac{\partial^2 T}{\partial p^2} + \\
 & + \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial p} \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial \rho}{\partial p} \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\rho}{T} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\rho^2}{T} \frac{\partial T}{\partial p} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \\
 & \left. + \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial p} \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} + \rho \frac{\partial \rho}{\partial p} \frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{\rho}{T} \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\rho^2}{T} \frac{\partial T}{\partial p} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\rho^2 g^2}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)^2 \right\}
 \end{aligned} \tag{20}$$

где u и v - скорости в x - и y -направлениях на постоянном уровне давления, ω - вертикальная скорость в p -координатах, ϕ - высота геопотенциала, $\phi = gz$, а $\tilde{\lambda}$ - тепловая проводимость.

Для вычисления потоков энтропии в область ТЦ были использованы комплексные данные NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research). Эти 4D-данные, полученные из различных источников (в основном спутниковых), после тщательного дополнительного анализа становятся доступными на сетке $1^\circ \times 1^\circ$ по горизонтали и семнадцатью уровнями по высоте с шестичасовым интервалом по времени.

При вычислении потоков энтропии использовалось выражение, определяемое формулой (20). Вычисленные потоки энтропии анализировались как в горизонтальных, так и в вертикальных сечениях, кроме того анализировался полный поток энтропии (ППЭ) в 3D-область ТЦ.

Рассмотрим результаты компьютерной реализации энтропийной модели урагана как физического явления на примере урагана Катрина. Ураган просуществовал около 8-ми суток, с 23 по 31 августа 2005 г. Максимальная устойчивая скорость ветра составляла 77 м/с с кратковременными усилениями до 85 м/с. Минимальное давление в центре составляло около 900 гПа с пиковыми значениями 890 гПа. Ураган 26 августа прошел над южной окраиной полуострова Флорида, при этом скорость ветра в нем несколько снизилась. В период с 27 по 29 августа он достиг своего максимального развития и в течение 30-31 августа диссипировал в прибрежной зоне, нанеся сокрушительный урон Луизиане и особенно городу Новый Орлеан. На рис. 4 представлены горизонтальные и вертикальные сечения полей потока энтропии в область урагана Катрина. Темные тона на рисунке идентифицируют области отрицательных потоков энтропии (негэнтропии) в тело урагана из окружающей среды, способствующие интенсификации вихря. Обращают на себя внимание две области аномальных значений негэнтропии в горизонтальном сечении поля энтропии на уровне 850 мб в период максимальной интенсификации урагана 29 августа. Это сечения двух тепловых башен (ТБ), 3D-реконструкция которых, на основе данных приборов TRMM, детально обсуждалась в (Головкин, Кондранин, 2011). ТБ - специфические облачные образования, формирующиеся вокруг «глаза» урагана в виде конвективных сильно вытянутых по вертикали структур. Приведенные на рисунке вертикальные сечения поля энтропии (вдоль 31° с.ш. и 89° з.д.) подтверждают данные 3D-реконструкции (на основе информации TRMM), что ТБ урагана Катрина в период максимальной интенсификации достигали высот 16 км (вплоть до тропопаузы). В процессе проявления ТБ за короткое время высвобождается огромное количество энергии, подпитывающее внешние области вокруг «глаза» урагана и тем самым, обеспечивая разгон воздушных потоков до гигантских скоростей.

На рис. 5 приведены результаты сопоставления временной зависимости ППЭ и оценок максимальной скорости приповерхностного ветра с тем же шестичасовым интервалом (31 точка на временной шкале) из базы данных Национальной Службы Погоды США (Unisys Best Track) в течение всей эволюции ТЦ.

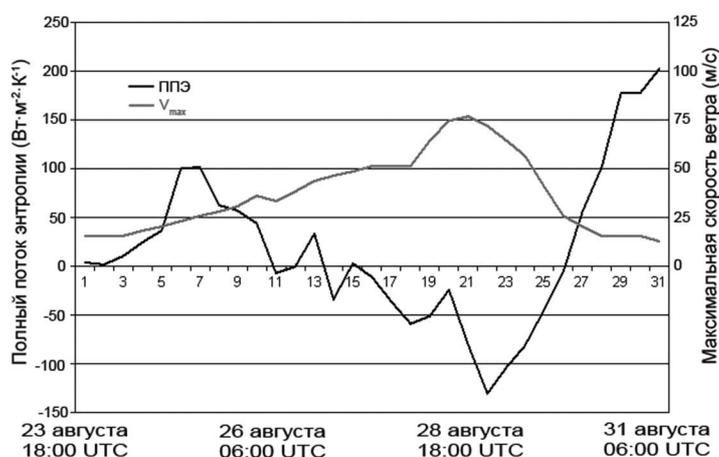


Рис. 5. Сопоставление временной зависимости ППЭ и результатов наблюдений максимальной скорости приповерхностного ветра для урагана Катрина

Представленный на рисунке график эволюции усредненного по границе урагана вектора потока энтропии имеет две особенности. Первая особенность проявляется в виде локального максимума потока энтропии 25 августа в период начала прохождения урагана над полуостровом Флорида. Это означает, что ураган над сушей начал диссипировать с производством положительных потоков энтропии. Далее график, осциллируя, демонстрирует монотонное убывание потока энтропии с переходом через нуль (т.е. начало самоорганизации с интенсификацией вихря) и достижение локального минимума (вторая особенность) в период максимальной интенсивности урагана, после чего начинается резкий рост потока энтропии с повторным обратным переходом через нуль, что соответствует периоду начала окончательной диссипации вихря. В целом данные, приведенные на рис. 5, демонстрируют хорошее их соответствие (в противофазе) с лучшей детализацией и чувствительностью в данных ППЭ.

Анализ результирующего знака ППЭ даёт важную информацию о стадии эволюции ТЦ: максимальные значения по абсолютной величине неэнтропии соответствуют наивысшей стадии развития ТЦ, в то время как переход ППЭ от отрицательных к положительным значениям означает начало диссипации вихря. Метод анализа ППЭ оказался весьма чувствительным и позволяет идентифицировать ТЦ даже в данных глобальных климатических моделей (GCM), имеющих сравнительно низкое пространственное разрешение (как правило, $2.5^\circ \times 2.5^\circ$). Проведенные исследования показали, что анализ потоков энтропии в область ТЦ является мощным средством прояснения основных механизмов жизненного цикла атмосферных систем и эффективным средством как диагностики, так и прогноза их интенсивности в ходе всей эволюции: от зарождения до диссипации.

Диагностика и геопроектирование

В последние годы интерес к изучению ТЦ существенно вырос, что, в частности, связывается с проблемой глобального потепления (Головка, 2006; Головка, Кондранин, 2011). После мощнейшей атаки на побережье США серии ураганов высшей 5-ой категории (Катрина, Рита, Вилма) в августе-октябре 2005 г., приведшим к катастрофическим последствиям, Природа вновь обрушила свою мощь на страны Карибского бассейна в 2008 г. Ураганы Густав и

Айк в августе-сентябре 2008 г. - яркое тому подтверждение. Нанесенный ураганами в 2008 г. ущерб был велик, но он во много раз меньше потерь 2005 г., и в этом определяющая заслуга средств космического мониторинга и прогнозирования эволюции ураганов, продемонстрировавших большой технологический прогресс за прошедшие годы. Сейчас ясно, что пока разрушительные последствия ТЦ будут столь значительными, а прогноз будущей динамики потенциальной интенсивности вихрей будет неутешительным, актуальность решения задачи космического мониторинга интенсивности ТЦ с помощью новейших инновационных технологий будет несомненна.

Использование новейших космических технологий позволило в последние годы уменьшить ошибки локализации точки выхода ТЦ на сушу и его расчетной интенсивности почти вдвое. Причиной столь радикального уточнения диагностики и прогноза явилось значительное улучшение точности оценок влажности в нижней тропосфере и приповерхностного давления, то есть тех параметров, которые являются наиболее критичными при прогнозе эволюции ураганов. Печальный опыт последствий ураганов 2005 г. был учтен и правильные выводы о необходимости проведения защитных работ геопроектирования были сделаны. Это подтверждают события вторжения 1 сентября 2008г. урагана Густав на ту же территорию (где прошел ураган Катрина), когда уже 31 августа в Новом Орлеане была объявлена всеобщая эвакуация (всего штат Луизиана при этом покинули более 2 млн. человек) и начаты экстренные работы по геопроектированию для смягчения возможных катастрофических последствий. Аналогичные меры предосторожности были предприняты и относительно урагана Айк, вышедшего на сушу 13 сентября 2008 г. в штате Техас недалеко от космического центра НАСА.

Заключение

Изучение открытых систем и самоорганизации в них - одно из наиболее перспективных направлений в современной геокосмической физике. Заслугой современной неравновесной термодинамики является установление того факта, что самоорганизация является общим свойством открытых систем и при этом именно неравновесность служит источником упорядоченности (*Пригожин, 1985*).

Большинство аномальных явлений в системе поверхность-атмосфера Земли, так или иначе, связаны с образованием диссипативных структур. Все наиболее важные явления, несмотря на их многообразие, имеют общую черту: в ходе неравновесного процесса из пространственно однородного состояния самопроизвольно (спонтанно) возникает пространственно-временная структура. Важно, что в системах, где возможно формирование структур, второе начало термодинамики не нарушается, а лишь проявляется в более общем виде, уточняя условия структурирования системы. В частности, стационарная неравновесная система, имеющая диссипативную структуру, должна потреблять отрицательную энтропию (негэнтропию). Поэтому анализ потоков энтропии и, в частности, негэнтропии приобретает первостепенную важность.

Создание принципиально новых космических систем наблюдения, примером которых является перспективная космическая группировка CLARREO, открывает беспрецедентные возможности диагностики аномальных геофизических явлений и прогноза их эволюции. Комплексный анализ спектральных энергетических и энтропийных потоков падающего солнечного излучения, а также отраженного коротковолнового и уходящего длинноволнового излучений, трансформированных системой поверхность-атмосфера Земли, позволяет перейти на качественно новый уровень понимания скрытых геофизических процессов и проявления их предвестников.

Рассмотренный в статье пример численного анализа проявления самоорганизации в атмосфере в виде мощного атмосферного вихревого образования – ТЦ, хотя и является

частным, но демонстрирует общий подход к исследованию аномальных природных явлений. Важность этого примера еще и в том, что согласно одному из вероятных сценариев изменения климата на нашей планете продолжающееся глобальное потепление может привести к дальнейшему росту частоты проявления и разрушительной силы ТЦ, и, следовательно, к существенному увеличению наносимого ущерба. Пожалуй, одним из самых «апокалипсических» последствий глобального потепления является возможность возникновения гиперураганов (гиперганов). По предварительным результатам математического моделирования скорость ветра в гипергане может превышать 250 м/с, при этом размеры гипергана могут на порядок превышать размеры самых мощных из известных ТЦ.

В связи с планетарным масштабом возможных грядущих изменений, исследования в области инновационных подходов к решению проблемы космического мониторинга предвестников и эволюции аномальных природных явлений приобретают особую актуальность.

Автор выражает свою благодарность студенту МФТИ Станевичу И.И. за помощь в подготовке компьютерных иллюстраций результатов расчетов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-01-00379-а.

Литература

1. *Базаров И.П.* Термодинамика. М.: Высшая школа, 1991. 376 с.
2. *Головко В.А.* Математическое моделирование активности ураганов по данным радиационных наблюдений из космоса // Исследование Земли из космоса. 2006. № 5. С. 12-37.
3. *Головко В.А., Кондранин Т.В.* Космический мониторинг крупномасштабных атмосферных явлений. Учебное пособие. М.: МФТИ, 2011. 178 с.
4. *Пригожин И.* От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985. 327 с.
5. *Goody R., Abdou W.* Reversible and irreversible sources of radiation entropy // Q. J. R. Meteorol. Soc., 1996, 122, 483-494.
6. *Liu Y., Liu C.* Entropy Flow and the Evolution of a Storm // Entropy, 2008, 10, 430-440.
7. *Paltridge G.W.* Global dynamics and climate – a system of minimum entropy exchange // Q.J.R. Meteorol. Soc., 1975, 101, 475-484.
8. *Peixoto J. P., Oort A. H., Almeida M., Tomi A.* Entropy budget of the atmosphere // J. Geophys. Res., 1991, 96, 10981-10988.
9. *Stephens G.L., O'Brien D.M.* Entropy and climate, I, ERBE observations of the entropy production // Q.J.R. Meteorol. Soc., 1993, 119, 121-152.
10. *Wu W. and Liu Y.* Radiation entropy flux and entropy production of the Earth system // Rev. Geophys., 2010, 48, RG2003, doi:10.1029/2008RG000275.
11. *Wu W., Liu Y., Wen G.* Spectral solar irradiance and its entropic effect on earth's climate // Earth Syst. Dynam. Discuss., 2011, 2, 45-70.

Entropy metrics of extreme geophysical phenomena for diagnostics and geoen지니어ing

V.A. Golovko

Scientific Research Center of Space Hydrometeorology "Planet"

123242 Moscow, B. Predtechensky per., 7

E-mail: golovko@planet.iitp.ru

The concept of entropy metrics and its relevant principles, mainly the estimation of the effect of negative entropy flux on the self-organization of atmospheric systems are reviewed. The principle of the non-equilibrium thermodynamics, as well as their possible applications to geospace physics are discussed too. The high-resolution measurements of the spectral solar irradiance at the top of the Earth's atmosphere by the Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE) satellite are used to examine the magnitude and spectral distribution of the Earth's entropy flux from the TOA incident solar radiation. A future space mission CLARREO proposed for highly accurate decadal change observations sensitive to the most critical climate radiative forcings is reviewed. The analysis of negative entropy flux, based on satellite data, which is able to provide a new insight into the mechanism responsible for the evolution of a tropical cyclone system as well as a new approach to predicting its intensity trend, are given.

Keywords: non-equilibrium thermodynamics, entropy flux, anomaly of geophysical fields, tropical cyclones, diagnostics of atmospheric catastrophe.