РАЗДЕЛ II. ФИЗИКА

Канцырев Б.Л.

Моделирование квазистационарных тепло-гидравлических процессов в земной атмосфере при малых силах инерции

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
(Россия, Москва)*

doi: 10.18411/gdsn-28-02-2019-02

idsp: scienceconf-28-02-2019-02

Аннотация

Рассмотрено решение системы уравнений двухфазной и двух-компонентной среды, моделирующей атмосферный влажный воздух с каплями воды. Система уравнений является обобщением модели [1], предполагающей малость сил инерции по сравнению с силой тяжести. В рамках представленной модели давление воздуха определяется массой воздушного столба над ним. Представлены результаты, полученные в рамках модели, которые позволят интерпретировать индивидуальное влияние каждого из нескольких важных параметров задачи на состояние климата, понимаемого как характеристики атмосферы, осреднённые по длительному периоду времени (полгода и больше).

Ключевые слова: радиационно-конвективная модель, коэффициент поглощения, коротковолновый диапазон, длинноволновый диапазон, влажность воздуха, численная концентрация капель в единице объёма, межфазный теплообмен.

Abstract

The solution of the system of equations of a two-phase and two-component environment simulating atmospheric humid air with water droplets is considered. The system of equations is a generalization of the model [1], which assumes that the inertial forces are small compared with the force of gravity. In the framework of the presented model, the air pressure is determined by the mass of the air column above it. The results obtained in the framework of the model are presented, which will allow interpreting the individual influence of each of several important parameters of the problem on the climate condition, understood as characteristics of the atmosphere, averaged over a long period of time (half a year or more).

Введение

Как известно, за последние 20-40 лет были разработаны много численные модели земной атмосферы для оценки изменений климата, происходящих из-за изменения состава атмосферы и её теплового режима. В наши дни наиболее актуальны модели, точно учитывающие балансы массы и энергии компонент атмосферы на основании замкнутой системы уравнений газодинамики и переноса излучения. Поскольку основными атмосферными процессами являются преобразование энергии излучения, поступающего на Землю от Солнца, в кинетическую и тепловую энергию атмосферы, а также тепло- и массообмен с поверхностью океана, значение радиационно-конвективных моделей не снижается со временем. Причём, если для прогнозирования погоды на местности важнейшее значение имеет адвекция (горизонтальный перенос воздушных масс), которая обуславливает приток холодного или тёплого воздуха из соседних областей, то для прогнозирования глобальных изменений климата главным является баланс притока солнечного излучения на Землю и пере-излучение прогретой подстилающей поверхности в атмосферу, теплообмен атмосферы с океаном или сушей, а также изменение теплового состояния атмосферы. Все эти процессы, имеющие

вертикальное направление, целесообразно моделировать в рамках системы уравнений с одной пространственной координатой. Данное утверждение было обосновано в работе академика Р.И. Нигматулина [1]. С предложенной в [1] системой уравнений согласуются результаты работы [2]. В настоящей работе модель [1] обобщена для воздушного столба с водяными парами и осаждением капель.

Система уравнений.

Так же как и в [3], запишем уравнение притока тепла в атмосфере. В настоящей работе это уравнение удобно представить в виде баланса энтропии влажного воздуха, которое в правой части содержит слагаемые, соответствующие поглощению или выделению тепла за счёт турбулентной теплопроводности и взаимодействия атмосферного воздуха с излучением, контактного теплообмена атмосферных паров воды с взвешенными каплями (фазовый переход в атмосфере) и не содержит работу сил давления. Адвекция тепла не учитывается, поскольку конвективная (вертикальная) составляющая градиента температуры и потенциальной температуры многократно больше горизонтальной (адвективной). Таким образом:

$$\rho_g T_g \frac{dS_g}{dt} = Q_{\text{turb}} + Q_{g-\sigma} + Q_{\text{rad}}, \quad (1)$$

Где индекс 'g' относится к гомогенной смеси сухого воздуха (состав которого в земной атмосфере, как известно, не меняется вплоть до высот около 90 км.) и водяных паров. Вертикальный поток тепла, обусловленный турбулентным перемешиванием, принят в соответствии с [3];

$$q_T = -\lambda_T \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad \theta - \text{потенциальная температура, } \theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = T_0 \exp \left(\frac{S}{C_p} \right),$$

$$\text{Объёмные источники в правой части (1) } Q_{\text{turb}} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right), \quad Q_{\text{rad}} = \frac{\partial}{\partial z} (G - U),$$

ρ - плотность воздуха, T, S - температура и энтропия влажного воздуха, G и U - нисходящий и восходящий потоки излучения (в рамках двух-поточковой модели), t и z – соответственно время и вертикальная координата, λ - теплопроводность воздуха,

соответствующая конвективному турбулентному переносу тепла, оператор $\left(\frac{d}{dt} \right)$

соответствует субстанциональной производной.

$Q_{g-\sigma}$ - удельная мощность контактного теплообмена между атмосферной паровой и жидкой фазой. Моделируется в соответствии с закономерностями теплообмена на поверхности капель, рассмотренными в монографии [4]. Поскольку в земной атмосфере жидкая фаза присутствует вплоть до высот около 6 км., для больших высот рассматривается теплообмен между частицами льда и водяными парами.

Уравнение газо-статики :

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g, \quad (2)$$

где g – ускорение силы тяжести, ρ - плотность атмосферного воздуха, включающая в себя сухой воздух, водяные пары и водяные капли.

Уравнение неразрывности, которое удобно записать в рамках одномерной модели вертикальных процессов, как уравнение для расчёта вертикальной скорости влажного воздуха:

$$\frac{\partial w_g}{\partial z} = - \frac{1}{\rho_g} \frac{d\rho_g}{dt}. \quad (3)$$

Уравнение состояния влажного воздуха:

$$p = \rho_g RT. \quad (4)$$

где R - газовая постоянная, которая зависит от массовой доли водяных паров χ_{vap} в атмосфере и газовых постоянных водяного пара R_{vap} и сухого воздуха R_{dry} :

$$R = R_{\text{vap}} \chi_{\text{vap}} + R_{\text{dry}} (1 - \chi_{\text{vap}}), \quad (5)$$

$$\chi_{\text{vap}} = \frac{\rho_{\text{vap}}}{\rho_g}.$$

Для моделирования движения капель в атмосфере используется уравнение баланса счётной концентрации капель « n » (число капель в единице объёма атмосферного воздуха), движущихся с вертикальной скоростью « w_d »:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial n w_d}{\partial z} = J_d. \quad (6)$$

Интенсивность появления центров образования капель в атмосфере « J_d » в рамках данной модели определяется из предположения о релаксационном установлении равновесной интенсивности, соответствующей экспериментально наблюдаемой экспоненциально убывающей зависимости концентрации взвешенных частиц от высоты в неподвижной атмосфере:

$$J_d = - \frac{(n - n^*)}{\tau_{\text{rel}}}, \quad n^* = n^{\circ} e^{-\frac{z}{L}}. \quad (7)$$

(В расчётах обычно полагалось, что $\tau_{\text{rel}} \sim 10^5$ s.) В воздухе с температурой, меньшей температуры насыщенных водяных паров на поверхности центров образования капель, вода конденсируется и капли растут. При температуре, большей температуре насыщения, капли испаряются. Скорость движения капель « w_d » относительно атмосферного воздуха определяется известными из литературы эмпирическими зависимостями. Для моделирования движения водной компоненты, состоящей из частиц (капли- льдинки) и водяного пара, она рассматривается, как гетерогенная среда с объёмным содержанием частиц « α_d »;

$$\frac{\partial (\alpha_d \rho_d^{\circ} + \alpha_g \rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_d \rho_d^{\circ} w_d + \alpha_g \rho_g w_g)}{\partial z} = 0., \quad (8)$$

$$\alpha_d = \frac{4}{3} \pi r^3 n, \quad \alpha_d + \alpha_g = 1, \quad \rho_g = \rho_v + \rho_{\text{dry}},$$

Уравнения радиационного переноса записаны с учётом ослабления за счёт поглощения излучения аналогично работе [2].

В качестве граничного условия для интегрального коротковолнового потока падающего излучения G_1 на условной «верхней границе атмосферы» принята величина, равная солнечной постоянной, умноженной на косинус зенитного угла, который рассчитывается с учётом суточных и сезонных изменений для данной

географической широты. Соответствующий поток падающего излучения длинноволнового диапазона принят равным нулю.

Граничное условие для тепловой задачи на подстилающей поверхности записано в виде:

$$\delta(G_0 - \sigma T_0^4) - \lambda_{gr} \left(\frac{\partial T_{gr}}{\partial z} \right)_0 + \lambda_{air} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_0 - G_{d0} (e_d - e_0) = L J_{(z=0)}, \quad (9)$$

где величина G_0 представляет собой суммарный поток падающего излучения, достигший земной поверхности, а T_0 – температура земной поверхности.

δ -коэффициент излучательной способности подстилающей поверхности. Второе и третье слагаемые в левой части уравнения представляют потоки, переносимые теплопроводностью в грунте (или океанской воде) и в атмосфере вблизи нижней границы атмосферы. $L = L(T)$ – удельная на единицу массы теплота фазового перехода (испарения воды или сублимации льда). G_{d0} – удельный массовый поток, переносимый каплями (положительный для восходящего потока и отрицательный для нисходящего), e_d – внутренняя энергия капель вблизи подстилающей поверхности, e_0 – внутренняя энергия воды на линии насыщения, если $G_{d0} < 0$, J – массовый поток паров воды, создаваемый испарением или конденсацией. Для моделирования массового потока испарения использовалось решение задачи о предельных процессах на межфазной поверхности при медленном изменении условий вдали от поверхности [4, § 2.9].

Результаты.

Приведённые ниже примеры влияния изменений параметров модели на решение дают возможность интерпретации климатических изменений в земной атмосфере с позиций технической теплофизики.

На рис. 1. Представлен процесс установления периодического решения, соответствующего периодическим суточным и сезонным изменениям светового потока солнечного излучения для широты Москвы. Как видно, при увеличении осреднённого коэффициента поглощения излучения атмосферным воздухом в два раза, характерное время процесса установления и величина предельного давления (из-за разогрева подстилающей поверхности и увеличения испарения воды в атмосферу) – увеличивается.

Следует отметить, что при этом не происходит неограниченное увеличение испарения вследствие разогрева, обусловленного повышением содержания водяных паров в атмосфере, а устанавливается периодическое решение.

На рис. 2. Представлены зависимости от времени для температуры подстилающей поверхности и атмосферы на высоте 50 м. для различных в десять раз начальных значений концентрации активных центров капле-образования. Как видно, рост содержания атмосферной влаги приводит к снижению температуры подстилающей поверхности и нижних слоёв воздуха.

$$K_1 = 1.10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

$$K_2 = 3.10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

$$K_1 = 5.10^{-5} \text{ m}^{-1}$$

$$K_2 = 1.510^{-4} \text{ m}^{-1}$$

1

Рис. 1

Зависимость от времени для давления влажного воздуха на земной поверхности при различных (в два раза) коэффициентах K_1 и K_2 поглощения радиации.

Рис. 2

Зависимость от времени для температуры подстилающей поверхности и прилегающего слоя атмосферного воздуха. Период времени, соответствующий установлению периодичности решения (1 год)- пропущен.

Рис. 3.

Зависимость от высоты для водности (объёмного содержания капель в атмосфере) в летний сезон. Косинус угла, соответствующий высоте Солнца над горизонтом, равен 0.82 при географической широте 50 ° N.L.

На рис.3. представлено распределение по высоте для объёмной доли капель в атмосфере : $\alpha = \frac{4}{3} \pi r_d^3 n$,

Где α - объёмная доля капель в атмосфере, r_d – радиус сферической капли, n - локальное число капель на единицу объёма в атмосфере. Поскольку известно, что для высот, больших 5-6 км, где температура воздуха ниже нуля по Цельсию, для моделирования массовой доли водяного пара в атмосфере на больших высотах использовалось эмпирическое соотношение Зюринга для парциального давления водяных паров.

Заключение

Полученные результаты показывают, что созданная расчётная модель может интерпретировать вертикальные процессы тепло- и массо-обмена в атмосфере, приводит к результатам, не противоречащим наблюдениям и точно учитывает массовый баланс как для атмосферного воздуха в целом, так и для водной компоненты (пары воды и капли). Последнее утверждение следует из выводов работ [1] и [2]. В последней из упомянутых работ было показано, что в рамках безынерционного приближения модели Экмана уравнение неразрывности (3) можно считать одномерным и баланс массы учитывается процессами фазового перехода в объёме атмосферного столба и на его нижней границе с подстилающей поверхностью.

1. Р.И. Нигматулин, «Уравнения гидро- и термодинамики атмосферы при малых силах инерции по сравнению с силой тяжести», Прикладная математика и механика, 2018, Т. 82, Вып.4, стр 472-484.
2. Б.Л. Канцьев. «Анализ влияния поглощения длинноволнового излучения на разогрев приземной атмосферы и земной поверхности», Наука России: Цели и задачи. Сборник научных трудов, по материалам VIII международной научно-практической конференции 10 апреля 2018 г. Изд. НИЦ «Л-Журнал.», 2018, стр 19-24.
3. Б.Л. Канцьев, «Влияние параметров атмосферного воздуха и поверхностного испарения водяного пара на решение квазистатической системы уравнений метеорологии и переноса излучения.», Известия КГТУ им. Раззакова, 2018, № 3 (47), стр 309-318

4. R.I. Nigmatulin, «Dynamics of multiphase media», V1, New York. 'Hemisphere', 1990, 507 p.