

# Модели взаимодействия атмосферы с различными типами поверхности Земли

*И.В. Мингалев, Е.А. Федотова, А.И. Мингалев, К.Г. Орлов*

*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Мурманская обл.*

В данной работе обсуждаются численные модели взаимодействия между атмосферой и приповерхностным слоем океана, рек, озер, болот, пустынь, степей и различных лесов. Представлены краткие описания моделей и обсуждаются результаты тестовых расчетов.

При взаимодействии атмосферы с поверхностью Земли происходит теплообмен между атмосферой и веществом литосферы за счет молекулярной теплопроводности и турбулентного движения атмосферы в приповерхностном слое, так называемые явные потоки тепла. Кроме того, происходит испарение воды, а также конденсация и выпадение осадков эти процессы создают поток массы воды и поток энергии, который называется скрытым потоком тепла. Также поверхность поглощает солнечное излучение, а также тепловое излучение атмосферы, кроме того, поверхность сама испускает тепловое излучение и отражает часть падающего на него излучения.

В современных моделях общей циркуляции атмосферы, взаимодействие атмосферы с водоёмами и сушей во многих случаях описывается достаточно упрощённо.

Важной задачей является создание одномерных моделей взаимодействия атмосферы с океаном, различными грунтами, болотами, с более детальным описанием физических процессов по сравнению с описанием этих процессов в существующих моделях общей циркуляции, которые используются для прогноза погоды ведущими мировыми центрами.

### **Постановка задачи**

**Нужно построить модель, которая рассчитывает потоки тепла и воды во всех состояниях между атмосферой и литосферой, а также потоки излучаемой поверхностью радиацией. В этой модели должны учитываться следующие процессы:**

1. Теплообмен между атмосферой и поверхностью.
2. Перенос тепла в верхнем слое литосферы.
3. Испарение и конденсацию пара на поверхности Земли.
4. Выпадение осадков на поверхность.
5. Перенос влаги в грунте.
6. Испарение и конденсации с листьев травы и деревьев.
7. Теплообмен атмосферы и листьев.
8. Перенос влаги и тепла в кроне.
9. Перенос влаги между грунтом и корневой системой растений.
10. Поглощение тепловой и солнечной радиации и испускание тепловой радиации кроной растений и грунтом.

Физическая задача для температур больших нуля градусов Цельсия состоит в следующем. Даны температура атмосферы, скорость ветра у поверхности Земли, влажность воздуха, параметры турбулентности в приповерхностном слое, падающее излучение, тип литосферы (океан, болото, степь, лес, пустыня, влажный грунт) и его характеристики. А именно: теплопроводность, порозность требуемая для грунтов, альbedo, характерная скорость турбулентного перемешивания, необходимая для океана и озер, и начальный вертикальный температурный профиль верхнего слоя литосферы, кроме того, задана масса осадков, выпадающих в единицу времени и их температура. Для температур меньше либо равных нулю к начальным данным добавляется начальная толщина снега и толщина льда и их температуры.

Требуется найти вертикальный профиль температуры в приповерхностном слое литосферы, температуру поверхности, явные и скрытые потоки тепла, а также поток водяного пара. Для температур, меньших либо равных нулю по Цельсию, дополнительно требуется найти толщину льда и снега, вертикальный профиль температур для них.

Расчётной величиной является полная внутренняя энергия на единицу массы, а не температура. Это сделано по причине того, что нет однозначной связи между внутренней энергией и температурой при температуре 273,15 градуса Кельвина и удельная полная внутренняя энергия зависит также и от распределения воды между твердой и жидкой фазой.

Поскольку горизонтальные градиенты температуры в литосфере на три-четыре порядка меньше вертикальных градиентов температуры одномерная модель является оптимальным способом описания физических процессов.

### **Основные предположения модели взаимодействия атмосферы и леса**

Приняты упрощающие предположения, что деревья имеют следующее устройство. От нижней границы корня до верхней границы кроны проходит ствол постоянного сечения с диаметром  $d_{ств}$ . Предполагается, что ветки корневой системы расположены горизонтально и имеют заданную среднюю длину  $L_{кор}$ , и что от ствола к листьям также ведут горизонтальные ветки, средняя длина которых  $L_{вет}$  задана. Также предполагается, что крона начинается с некоторой высоты  $h_1$  и доходит до максимальной высоты дерева  $h_{max} > h_1$ . Также предполагается, что корневая система начинается с некоторой глубины  $z_1$  и доходит до минимальной глубины  $z_{min}$ .

Считается, что в грунте происходит перенос влаги только в вертикальном направлении, а также в горизонтальном от грунта к корневой системе деревьев.

Также считается, что у корневой системы и у кроны есть центральный ствол постоянного поперечного сечения и происходит перенос влаги вдоль веток корней к центральному стволу.

Считается, что вдоль ствола влага переносится от корней к верхней части ствола, а от неё к листьям. С листьев влага может испаряться.

Также, считается, что на поверхности грунта находится трава, а её корни находятся в верхнем слое грунта. С листьев травы и с поверхности грунта влага может испаряться.

На поверхности грунта может накапливаться вода или снег от осадков. Эта вода испаряется в атмосферу и фильтруется в грунт под действием силы тяжести.

## Уравнения модели

Вертикальный перенос влаги в грунте и в стволе корня (при высоте  $h < 0$  и ) описывается уравнениями:

$$\frac{\partial w_{\text{грунт}}}{\partial t} + \frac{\partial J_{\text{грунт}}}{\partial h} = -X_{\text{сток}}(h) \frac{1}{(1 - \delta_{\text{ств}})}, \quad J_{\text{грунт}} = -K_{\text{грунт}} \left( \frac{\partial P_{\text{грунт}}}{\partial h} + w_{\text{грунт}} g \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial w_{\text{ств}}}{\partial t} + \frac{\partial J_{\text{ств}}}{\partial h} = X_{\text{сток}}(h) \frac{1}{\delta_{\text{ств}}}, \quad J_{\text{ств}} = -K_{\text{ств}} \left( \frac{\partial P_{\text{ств}}}{\partial h} + w_{\text{ств}} g \right), \quad (2)$$

в котором  $t$  – время,  $w_{\text{грунт}}(t, h)$  и  $w_{\text{ств}}(t, h)$  – объемные влагосодержания грунта и ствола корня на глубине  $h < 0$  в момент времени  $t$ ,  $P_{\text{грунт}}(t, h)$  и  $P_{\text{ств}}(t, h)$  – всасывающие давление влаги в грунте и стволе корня (основная гидрофизическая характеристика), а  $K_{\text{грунт}}(t, h)$  и  $K_{\text{ств}}(t, h)$  – коэффициенты влагопроводности грунта и ствола корня,  $g$  – величина ускорения силы тяжести,  $\delta_{\text{ств}}$  – доля площади горизонтального сечения стволов от площади

поверхности Земли, над которой расположена крона этих стволов,  $X_{сток}(h)$  – поток влаги из грунта к стволу корня, заданный формулой  $X_{сток} = \frac{\pi d_{ств} K_{кор}}{L_{кор}} (P_{грунт} - P_{ств})$ .

На поверхности после осадков возможно временное наличие слоя воды высотой  $h_{новзан}$ . Масса этого слоя воды на единицу площади задана формулой  $m_{новзан} = \rho_{вод} h_{новзан} (1 - \delta_{ств})$ . Если  $h_{новзан} > 0$ , то в этом случае изменение  $m_{новзан}$  описывается уравнением

$$\frac{\partial m_{новзан}}{\partial t} = J_{осадки} - J_{испнов} - J_{новфил}, \quad (3)$$

в котором  $J_{осадки}$  – скорость выпадения осадков на единицу площади поверхности,  $J_{испнов}$  – скорость испарения с единицу площади поверхности, заданная формулой

$$J_{испнов} = v_{тур} (\rho_{наспар}(T_{нов}) - \rho_{паратм}), \quad (4)$$

в которой  $J_{осадки}$  – скорость турбулентного обмена на поверхности,  $\rho_{наспар}(T_{нов})$  – плотность насыщенного пара при температуре  $T_{нов}$ ,  $\rho_{паратм}$  – плотность пара в воздухе на поверхности Земли,  $J_{новфил}$  – скорость фильтрации воды через поверхность.

Если  $h_{\text{повзан}} = 0$ , то испарение с поверхности складывается из испарения с грунта и с листьев травы и вычисляется по формулам

$$J_{\text{исп пов}} = J_{\text{исп гр}} + J_{\text{исп трав}}, \quad (5)$$

$$J_{\text{исп гр}} = \quad, \quad J_{\text{исп трав}} = \quad, \quad (6)$$

Вертикальный перенос влаги в стволе кроны (при высоте  $h > 0$ ) описывается уравнениями:

$$\frac{\partial w_{\text{ств}}}{\partial t} + \frac{\partial J_{\text{ств}}}{\partial h} = -X_{\text{пот лист}} \frac{1}{\delta_{\text{ств}}}, \quad J_{\text{ств}} = -K_{\text{ств}} \left( \frac{\partial P_{\text{ств}}}{\partial h} + w_{\text{ств}} g \right), \quad (7)$$

$$\frac{\partial w_{\text{лист}}}{\partial t} = \left( X_{\text{пот лист}} - X_{\text{исп}} \right) \frac{1}{\rho_{\text{лист}} S_{\text{уд}} d_{\text{лист}}}, \quad (8)$$

$$X_{\text{пот лист}} = \frac{\rho_{\text{лист}} S_{\text{уд}} \delta_{\text{уст}} K_{\text{ств}}}{L_{\text{вет}}} (P_{\text{ств}} - P_{\text{лист}}), \quad (9)$$

$$X_{\text{исп}} = \frac{\rho_{\text{лист}} S_{\text{уд}} \delta_{\text{уст}} D_{\text{диф}}}{L_{\text{вет}} d_{\text{уст}}} \left( \rho_{\text{нас пар}} (T_{\text{лист}}) \xi (w_{\text{лист}}) - \rho_{\text{нар атм}} \right), \quad (10)$$

в котором  $w_{\text{лист}}(t, h)$  – объемное влагосодержание листьев на высоте  $h > 0$  в момент времени  $t$ ,  $P_{\text{лист}}(t, h)$  и  $P_{\text{ств}}(t, h)$  – всасывающие давление влаги в листьях и стволе кроны (основная гидрофизическая характеристика),  $\delta_{\text{уст}} = 0.01$  – доля площади устьиц в площади листа,  $\rho_{\text{лист}}(h)$  – объемная плотность листьев,  $S_{\text{уд.лист}}$  – площадь листьев на единицу массы,  $d_{\text{лист}}$  – средняя толщина листа.



## Выводы

- 1) Создана и протестирована численные модели взаимодействия между атмосферой и приповерхностным слоем океана, рек, озер, болот, пустынь, степей и различных лесов.
- 2) Промоделировано.
- 3) Выявлено, что.