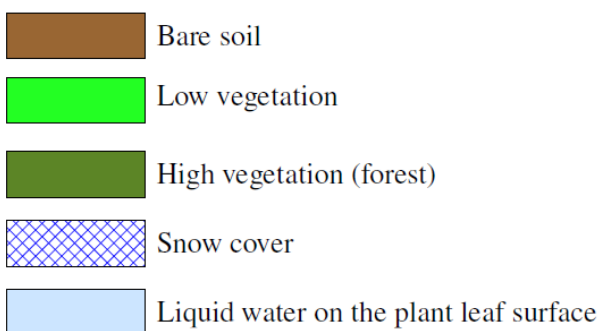
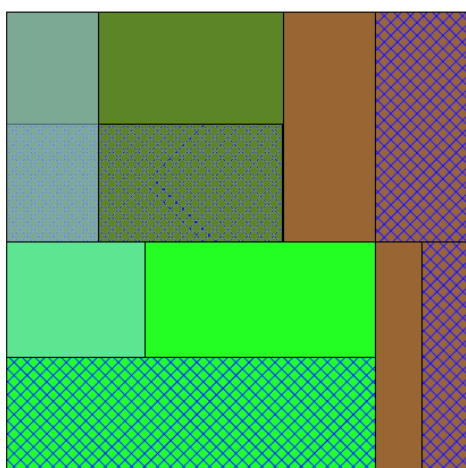


Взаимодействие между атмосферой и подстилающей поверхностью: потоки воды (в различных фазах) и тепла (энтروпии)

Состав подстилающей поверхности

Подстилающая поверхность единичной площади — это совокупность долей этой площади, занятых поверхностями с более или менее однородными, с точки зрения обменных с атмосферой процессов, характеристиками, а именно подстилающая поверхность может быть представлена голой почвой, низкой растительностью (трава, кустарник), которая может быть частично покрыта водой, высокой растительностью (лес), которая может быть частично покрыта водой, и снежным покровом.



Принимаются следующие гипотезы. При отсутствии снежного покрова подстилающая поверхность может быть представлена голой почвой, низкой растительностью и лесом. Если снежный покров присутствует, то он распределяется равномерно (пропорционально) по голой почве, низкой растительности и лесу, при этом с точки зрения взаимодействия с атмосферой «работает» только снег на голой почве и низкой растительности, в то время как в лесу снег как бы погружен под кроны деревьев и атмосфера его «не видит».

Если известны на единицы площади доля низкой растительности ($F_{veg\,low}$), доля поверхности листьев низкой растительности, покрытой водой ($F_{veg\,low}^{wet}$), доля леса (F_{forest}), доля поверхности листьев леса, покрытой водой (F_{forest}^{wet}), доля снежного покрова ($F_{snow\,cover}$), то можем определить доли площади, взаимодействующие с атмосферой:

$$1) \quad FRAC_{bare\,soil} = (1 - F_{forest}) \cdot (1 - F_{snow\,cover}) \cdot (1 - F_{veg\,low}) \quad - \text{голая почва,}$$

2) $FRAC_{lowveg}^{leaf\ dry} = (1 - F_{forest}) \cdot (1 - F_{snow}) \cdot F_{veg\ low} \cdot (1 - F_{veg\ low}^{wet})$ - не увлажнённая поверхность листьев низкой растительности,

3) $FRAC_{lowveg}^{leaf\ wet} = (1 - F_{forest}) \cdot (1 - F_{snow}) \cdot F_{veg\ low} \cdot F_{veg\ low}^{wet}$ - увлажнённая поверхность листьев низкой растительности,

4) $FRAC_{forest}^{leaf\ dry} = F_{forest} \cdot (1 - F_{forest}^{wet})$ - не увлажнённая поверхность крон высокой растительности (леса),

5) $FRAC_{forest}^{leaf\ wet} = F_{forest} \cdot F_{forest}^{wet}$ - увлажнённая поверхность крон высокой растительности (леса),

6) $FRAC_{snow} = (1 - F_{forest}) \cdot F_{snow}$ - поверхность снежного покрова.

Для каждого из этих четырёх типов подстилающей поверхности должны быть определены температура и влажность воздуха. «Суммарные» для данной площади температура, влажности воздуха и потоки будут определяться средним взвешенным значением (пропорционально заданным долям).

1. Температура и влажность воздуха над голой почвой

Температура ($T_{surf\ soil}$) равна температуре самого верхнего уровня почвы ($T_{soil\ 0}$). Влажность воздуха определяется диагностическим соотношением, приведённым ниже.

Для определения влажности воздуха на поверхности контакта голой почвы с атмосферой применяется, так называемый, «Альфа-метод»:

$$q_{v\ surf\ soil} = q_{v\ atm\ 1} \cdot (1 - \alpha) + q_{v\ sat}(T_{soil\ 0}) \cdot \alpha,$$

где:

$q_{v\ surf\ soil}$ — удельная влажность воздуха $\left(\frac{кг}{кг}\right)$ непосредственно на поверхности голой почвы,

$q_{v\ atm\ 1}$ — удельная влажность воздуха $\left(\frac{кг}{кг}\right)$ на самом нижнем атмосферном уровне,

$q_{v\ sat}(T_{soil\ 0})$ — удельная влажность $\left(\frac{кг}{кг}\right)$ насыщения при температуре поверхности почвы $T_{soil\ 0}$,

α - эмпирический параметр.

$$q_{v\ sat} = \begin{cases} q_{v\ sat}^{water}(T_{soil\ 0}), & \text{если } T_{soil\ 0} \geq T_0 \\ q_{v\ sat}^{ice}(T_{soil\ 0}), & \text{если } T_{soil\ 0} < T_0 \end{cases},$$

где $q_{v\ sat}^{water}$ и $q_{v\ sat}^{ice}$ - удельная влажность насыщения водяного пара над жидкой водой и над льдом при температуре $T_{soil\ 0}$.

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{K_{wv}^{turb}}{K_{wv}^{molec}} \cdot F(q_{soil\ 0})},$$

где

K_{wv}^{turb} — коэффициент турбулентного обмена водяным паром в поверхностном слое атмосферы $\left(\frac{м^2}{с}\right)$,

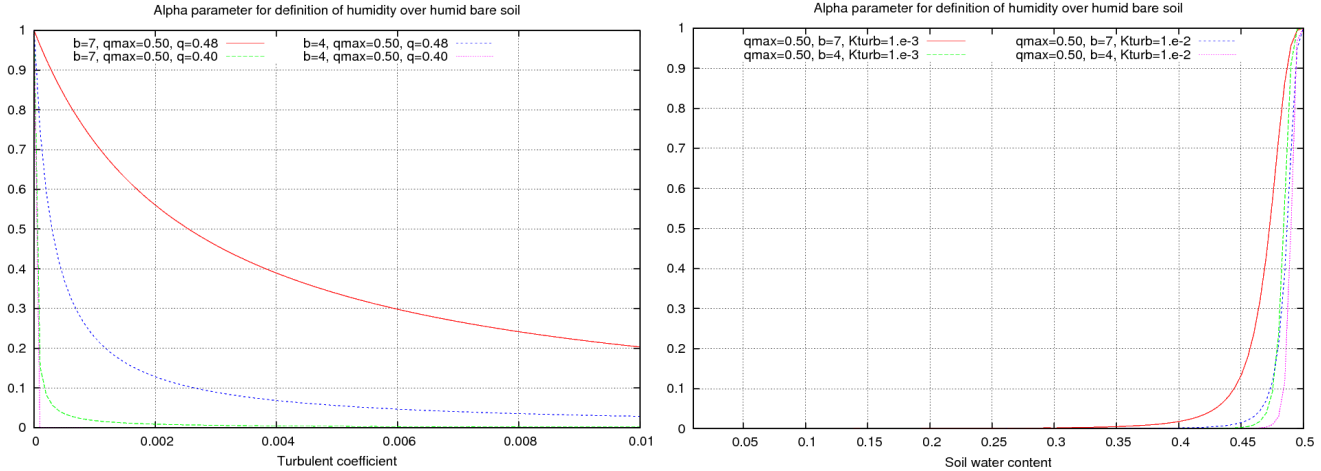
K_{wv}^{molec} - коэффициент молекулярного обмена водяным паром, $K_{wv}^{molec} = 2.26 \cdot 10^{-5} \left(\frac{м^2}{с}\right)$.

$F(q_{soil\ 0})$ — эмпирическая функция от влагосодержания ($q_{soil\ 0}$ $\left(\frac{M^3}{M^3}\right)$) самого верхнего почвенного уровня (слоя):

$$F(q_{soil\ 0}) = F_1 \left(q_{soil\ 0}^{max} - q_{soil\ 0} \right)^{F_2},$$

$$F_1 = \max \left\{ \frac{179.4}{b} - 14.85, 0.01 \right\}, \quad F_2 = \frac{18.0}{b} + 0.5,$$

где b — параметр, зависящий от текстуры почвы, тот же, что и в уравнении для потока почвенной влаги (закон Дарси).



Параметр α в зависимости от коэффициента турбулентного обмена водяным паром и влагосодержания поверхностного слоя почвы.

2. Температура и влажность воздуха над не увлажнённой поверхностью листьев низкой растительности

Температура ($T_{lowveg}^{leaf\ dry}$) равна температуре самого верхнего уровня почвы ($T_{soil\ 0}$). Влажность воздуха определяется диагностическим соотношением, приведённым ниже.

Сначала проверяется условие возможности эвапотранспирации низкой растительности (см. главу о параметризации растительности), если она не возможна, то влажность воздуха над неувлажнённой частью листа равна влажности воздуха на нижнем атмосферном уровне:

$$q_{v\ lowveg}^{leaf\ dry} = q_{v\ atm\ 1}.$$

При возможной эвапотранспирации для определения влажности воздуха на поверхности контакта между сухим листом, ответственным за процесс эвапотранспирации, и атмосферой применяется, так называемый, «Альфа-метод», по аналогии со случаем голой почвы:

$$q_{v\ lowveg}^{leaf\ dry} = q_{v\ atm\ 1} \cdot (1 - \alpha \cdot \beta) + q_{v\ sat}(T_{soil\ 0}) \cdot \alpha \cdot \beta,$$

где:

$q_{v\ lowveg}^{leaf\ dry}$ — удельная влажность воздуха $\left(\frac{kg}{kg}\right)$ на поверхности испаряющего и дышащего листа,

$q_{v\ atm\ 1}$ — удельная влажность воздуха $\left(\frac{kg}{kg}\right)$ на самом нижнем атмосферном уровне,

$q_{v \text{ sat}}(T_{soil0})$ — удельная влажность $\left(\frac{\kappa z}{\kappa z}\right)$ насыщения при температуре поверхности почвы T_{soil0} ,

α - эмпирический параметр, зависящий от коэффициента турбулентного обмена водяным паром в приповерхностном слое атмосферы и от интенсивности процесса эвапотранспирации, которая, в свою очередь, зависит от суммарного потока солнечной радиации и от листового индекса (LAI - Leaf Area Index),

β - параметр, определяемый влагосодержанием в корнеобитаемом слое почвы $\sum_{k=0}^{k_{root}} z_k = Z_{root}$, k_{root} — самый нижний уровень корнеобитаемой зоны почвы.

$$q_{v \text{ sat}} = \begin{cases} q_{v \text{ sat}}^{\text{water}}(T_{soil0}), & \text{если } T_{soil0} \geq T_0 \\ q_{v \text{ sat}}^{\text{ice}}(T_{soil0}), & \text{если } T_{soil0} < T_0 \end{cases},$$

где $q_{v \text{ sat}}^{\text{water}}$ и $q_{v \text{ sat}}^{\text{ice}}$ - удельная влажность насыщения водяного пара над жидкой водой и над льдом при температуре T_{soil0} .

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{K_{wv}^{\text{turb}}}{K_{wv}^{\text{molec}}}} \cdot F_{veg},$$

где:

K_{wv}^{turb} — коэффициент турбулентного обмена водяным паром в поверхностном слое атмосферы $\left(\frac{M^2}{c}\right)$,

K_{wv}^{molec} - коэффициент молекулярного обмена водяным паром, $K_{wv}^{\text{molec}} = 2.26 \cdot 10^{-5} \left(\frac{M^2}{c}\right)$,

F_{veg} — эмпирическая функция:

$$F_{veg} = \frac{1 + F_{LAI}}{F_{vis \text{ rad}} + 10 + 10 \cdot F_{LAI}},$$

$$F_{LAI} = \left[0.5 \cdot \left(\frac{LAI}{LAI_{max}} + 1 \right) \right]^{-8},$$

где :

$F_{vis \text{ rad}}$ — поток суммарной солнечной радиации в видимом диапазоне $\left(\frac{\text{Дж}}{M^2 c}\right)$ параметр,

LAI_{max} — максимально возможное значение листового индекса (LAI).

$$\beta = \frac{\sum_{k=0}^{k_{root}} \Delta z_k \cdot \begin{cases} 1, & \text{если } q_{soil \ k} \geq q_{soil \ k}^{\text{ref}} \\ \frac{q_{soil \ k} - q_{soil \ k}^{\text{wilt}}}{q_{soil \ k}^{\text{ref}} - q_{soil \ k}^{\text{wilt}}}, & \text{если } q_{soil \ k}^{\text{wilt}} < q_{soil \ k} < q_{soil \ k}^{\text{ref}} \\ 0, & \text{если } q_{soil \ k} \leq q_{soil \ k}^{\text{wilt}} \end{cases}}{Z_{root}}$$

или

$$\beta = \frac{\sum_{k=0}^{k_{root}} \Delta z_k \cdot F(q_{soil\ k})}{\sum_{k=0}^{k_{root}} \Delta z_k}, \quad F(q_{soil\ k}) = \begin{cases} 1, & \text{если } q_{soil\ k} \geq q_{soil\ k}^{ref} \\ \frac{q_{soil\ k} - q_{soil\ k}^{wilt}}{q_{soil\ k}^{ref} - q_{soil\ k}^{wilt}}, & \text{если } q_{soil\ k}^{wilt} < q_{soil\ k} < q_{soil\ k}^{ref} \\ 0, & \text{если } q_{soil\ k} \leq q_{soil\ k}^{wilt} \end{cases},$$

где

$q_{soil\ k}$ — удельное объёмное влагосодержание почвы (на уровне k) $\left(\frac{M^3}{M^3}\right)$,

$q_{soil\ k}^{wilt}$ — влагосодержание почвы (на уровне k), при котором растения завядают (перестают испарять),

$q_{soil\ k}^{ref}$ - влагосодержание почвы (на уровне k), при котором эвапотраспирация достигает наибольшей интенсивности (при дальнейшем увеличении влагосодержания эвапотраспирация не увеличивается).

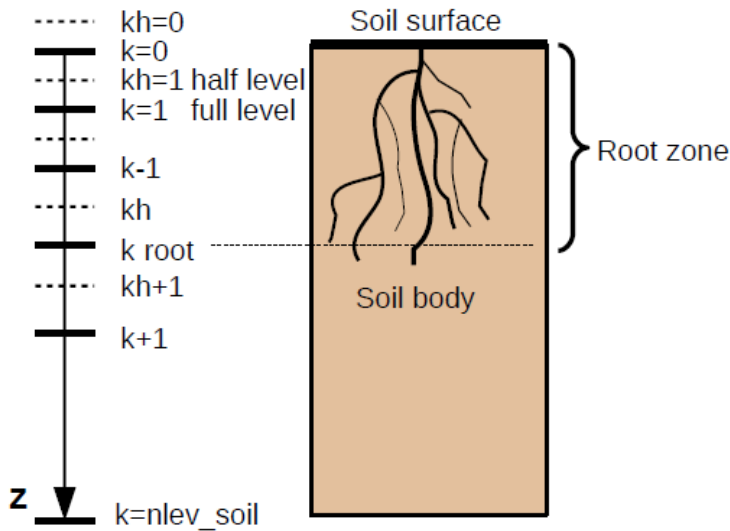
Удобнее использовать не абсолютные значения влагосодержания, а относительные: $q_{soil\ k}^{rel}$

$$q_{soil\ k}^{rel}, q_{soil\ k}^{rel\ wilt}, q_{soil\ k}^{rel\ ref}, \quad q_{soil\ k}^{rel} = \frac{q_{soil\ k} - q_{soil\ k}^{min}}{q_{soil\ k}^{max} - q_{soil\ k}^{min}},$$

$q_{soil\ k}^{min}$ — минимальное удельное объёмное влагосодержание почвы $\left(\frac{M^3}{M^3}\right)$,

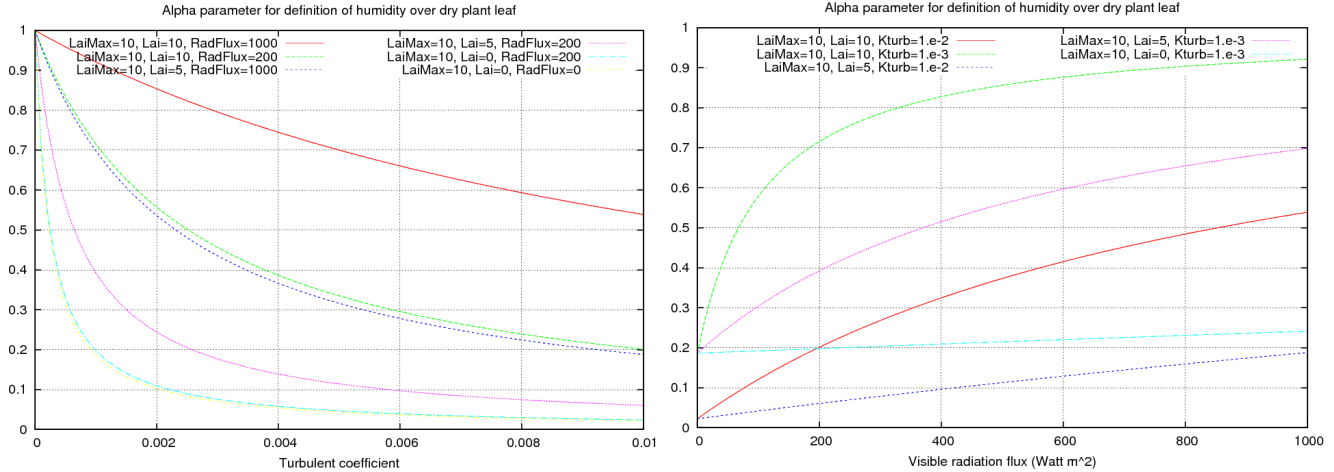
$q_{soil\ k}^{max}$ — максимальное удельное объёмное влагосодержание почвы $\left(\frac{M^3}{M^3}\right)$.

Введём конечно-разностное представление:



Тогда выражение для β можно записать в виде:

$$\beta = \frac{\sum_{k=0}^{k_{root}} (z_{kh+1} - z_{kh}) \cdot F(q_{soil\ k}^{rel})}{\sum_{k=0}^{k_{root}} (z_{kh+1} - z_{kh})}.$$



Параметр α в зависимости от коэффициента турбулентного обмена водяным паром и от потока суммарной видимой солнечной радиации.

3. Температура и влажность воздуха над увлажнённой суммарной поверхностью листьев низкой и высокой растительности

Температура ($T_{lowveg}^{leaf\ wet}$) равна температуре самого верхнего уровня почвы (T_{soil0}). Влажность воздуха равна влажности насыщения при данной температуре:

$$q_{v\ lowveg}^{leaf\ wet} = q_{v\ sat}(T_{soil\ 0}),$$

где $q_{v\ lowveg}^{leaf\ wet}$ — удельная влажность воздуха $\left(\frac{кг}{кг}\right)$ на поверхности испаряющего и дышащего листа, покрытого каплями воды (дождя или росы),

$q_{v\ sat}(T_{soil0})$ — удельная влажность $\left(\frac{кг}{кг}\right)$ насыщения при температуре поверхности почвы T_{soil0} .

$$q_{v\ sat} = \begin{cases} q_{v\ sat}^{water}(T_{soil0}), & \text{если } T_{soil0} \geq T_0 \\ q_{v\ sat}^{ice}(T_{soil0}), & \text{если } T_{soil0} < T_0 \end{cases},$$

где $q_{v\ sat}^{water}$ и $q_{v\ sat}^{ice}$ — удельная влажность насыщения водяного пара над жидкой водой и над льдом при температуре T_{soil0} .

4. Температура и влажность воздуха над не увлажнённой поверхностью листьев высокой растительности (леса)

В настоящей версии параметризация процессов, связанных с высокой растительностью (лесом) не рассматривается, принимается, что доля леса всегда равна нулю: $F_{forest}=0$ и $F_{forest}^{wet}=0$, поэтому температура ($T_{forest}^{leaf\ dry}$) и влажность воздуха ($q_{v\ forest}^{leaf\ dry}$) не определены.

5. Температура и влажность воздуха над увлажнённой поверхностью листьев высокой растительности (леса)

В настоящей версии параметризация процессов, связанных с высокой растительностью (лесом) не рассматривается, принимается, что доля леса всегда равна нулю: $F_{forest}=0$ и $F_{forest}^{wet}=0$, поэтому температура ($T_{forest}^{leaf\ wet}$) и влажность воздуха ($q_{v\ forest}^{leaf\ wet}$) не определены.

6. Температура и влажность воздуха над поверхностью снежного покрова

Температура ($T_{surf\ snow}$) равна температуре самого верхнего уровня снега (T_{snow0}). Влажность воздуха равна влажности насыщения при данной температуре:

$$q_{v\ surf\ snow} = q_{v\ sat}(T_{snow\ 0}) ,$$

где $q_{v\ surf\ snow}$ — удельная влажность воздуха $\left(\frac{\kappa_2}{\kappa_2}\right)$ на поверхности снега,

$q_{v\ sat}(T_{snow0})$ — удельная влажность $\left(\frac{\kappa_2}{\kappa_2}\right)$ насыщения при температуре поверхности снега T_{snow0} .

$$q_{v\ sat} = \begin{cases} q_{v\ sat}^{water}(T_{snow0}), & \text{если } T_{snow0} \geq T_0 \\ q_{v\ sat}^{ice}(T_{snow0}), & \text{если } T_{snow0} < T_0 \end{cases} ,$$

где $q_{v\ sat}^{water}$ и $q_{v\ sat}^{ice}$ - удельная влажность насыщения водяного пара над жидкой водой и над льдом при температуре T_{snow0} .

Температура и влажность воздуха над комплексной подстилающей поверхностью

Имея значения температуры и влажности воздуха над шестью возможными составляющими комплексной подстилающей поверхности и зная доля каждой составляющей, можно определить общую температуру (T_{surf}) и влажность воздуха ($q_{v\ surf}$).

$$T_{surf} = T_{surf\ soil} \cdot FRAC_{bare\ soil} + T_{lowveg}^{leaf\ dry} \cdot FRAC_{lowveg}^{leaf\ dry} + T_{lowveg}^{leaf\ wet} \cdot FRAC_{lowveg}^{leaf\ wet} + \\ + T_{forest}^{leaf\ dry} \cdot FRAC_{forest}^{leaf\ dry} + T_{forest}^{leaf\ wet} \cdot FRAC_{forest}^{leaf\ wet} + T_{surf\ snow} \cdot FRAC_{snow} ,$$

$$q_{v\ surf} = q_{v\ surf\ soil} \cdot FRAC_{bare\ soil} + q_{v\ lowveg}^{leaf\ dry} \cdot FRAC_{lowveg}^{leaf\ dry} + q_{v\ lowveg}^{leaf\ wet} \cdot FRAC_{lowveg}^{leaf\ wet} + \\ + q_{v\ forest}^{leaf\ dry} \cdot FRAC_{forest}^{leaf\ dry} + q_{v\ forest}^{leaf\ wet} \cdot FRAC_{forest}^{leaf\ wet} + q_{v\ surf\ snow} \cdot FRAC_{snow} ,$$

где

T_{surf} — температура (К) комплексной подстилающей поверхности,

$T_{soil\ surf}$ — температура (К), $q_{v\ surf\ soil}$ — удельная влажность $\left(\frac{\kappa_2}{\kappa_2}\right)$ воздуха на поверхности голой почвы и $FRAC_{bare\ soil}$ - доля этой поверхности, не покрытой ни растительностью ни снегом,

$T_{lowveg}^{leaf\ dry}$ — температура (К), $q_{v\ lowveg}^{leaf\ dry}$ — удельная влажность $\left(\frac{\kappa_2}{\kappa_2}\right)$ воздуха на не увлажнённой части поверхности листьев низкой растительности (К) и $FRAC_{lowveg}^{leaf\ dry}$ - доля этой поверхности,

$T_{lowveg}^{leaf\ wet}$ - температура (К), $q_{v\ lowveg}^{leaf\ wet}$ — удельная влажность $\left(\frac{\kappa_2}{\kappa_2}\right)$ воздуха на увлажнённой

(росой или дождём) части поверхности листьев низкой растительности (K) и $FRAC_{lowveg}^{leaf\ wet}$ - доля этой поверхности,

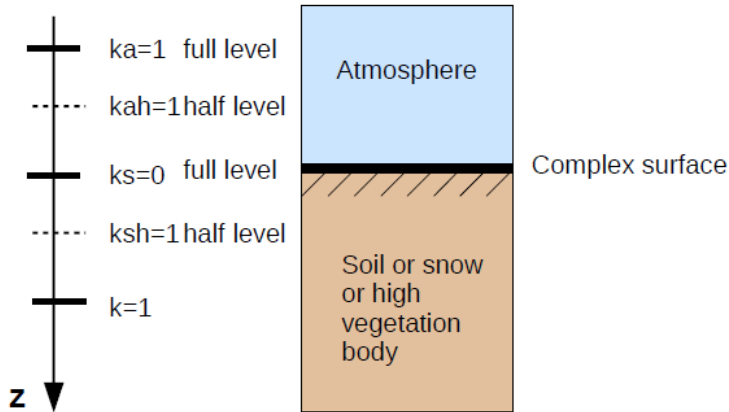
$T_{forest}^{leaf\ dry}$ - температура (K), $q_{v\ forest}^{leaf\ dry}$ — удельная влажность $\left(\frac{кг}{кг}\right)$ воздуха на не увлажнённой части поверхности листьев высокой (лесной) растительности (K) и $FRAC_{forest}^{leaf\ dry}$ - доля этой поверхности,

$T_{forest}^{leaf\ wet}$ - температура (K), $q_{v\ forest}^{leaf\ wet}$ — удельная влажность $\left(\frac{кг}{кг}\right)$ воздуха на увлажнённой (росой или дождём) части поверхности листьев высокой (лесной) растительности (K) и $FRAC_{forest}^{leaf\ wet}$ - доля этой поверхности,

$T_{snow\ surf}$ - температура (K) поверхности снега, $q_{v\ surf\ snow}$ — удельная влажность $\left(\frac{кг}{кг}\right)$ воздуха на и $FRAC_{snow}$ - доля этой поверхности, с учётом снега, лежащего на голой почве и низкой растительности, но без учёта снега, лежащего под кронами высокой (лесной) растительности.

Потоки воды и энтропии

Введём конечно-разностное представление как показано на рисунке:



Вертикальная ось направлена вниз в соответствии с условием, принятой в схеме процессом внутри почвы и внутри снежного покрова. Рассмотрим потоки водяного пара, атмосферных осадков и энтропии.

Поток водяного пара между комплексной подстилающей поверхностью и нижним атмосферным уровнем

Поток водяного пара $\left(\frac{кг}{м^2\ c}\right)$, возникающий под действием процесса турбулентного обмена между подстилающей поверхностью и атмосферой, определяется так:

$$Flux_{v\ surf}^{turb} = K_v^{turb} \cdot \rho_{a\ surf} \cdot \frac{q_{v\ surf} - q_{v\ a1}}{\Delta z_{a1}},$$

где:

K_v^{turb} — коэффициент турбулентного обмена водяным паром в поверхностном слое атмосферы

(surface layer) $\left(\frac{M^2}{c} \right)$,

$\rho_{a surf}$ — плотность воздуха $\left(\frac{K\mathcal{Z}}{M^3} \right)$ на подстилающей (комплексной) поверхности,

$q_{v surf}$ — удельная влажность воздуха $\left(\frac{K\mathcal{Z}}{K\mathcal{Z}} \right)$ на подстилающей (комплексной) поверхности,

$q_{v al}$ — удельная влажность воздуха $\left(\frac{K\mathcal{Z}}{K\mathcal{Z}} \right)$ на самом нижнем атмосферном уровне,

Δz_{al} — высота (м) самого нижнего атмосферного уровня над подстилающей поверхностью.

Определённый таким образом поток турбулентного обмена между подстилающей поверхностью и атмосферой $Flux_{v surf}^{turb}$ должен быть распределён между составляющими комплексной подстилающей поверхности для того, чтобы определить граничное условие для прогностического уравнения влагосодержания каждой из сред, находящейся под каждой из типов поверхностей. При распределении отдельно рассматриваются две ситуации: поток положителен, направлен вниз, происходит конденсация водяного пара на поверхности и поток отрицателен, направлен вверх, происходит испарение с поверхности. Рассмотрим подробно.

а) Поток направлен вниз — конденсация (сублимация)

$$Flux_{v surf}^{turb} \geq 0$$

Сначала «заполняем резервуары», находящиеся «наверху» и с потенциально наименьшей ёмкостью, т. е. вода на поверхности листьев растительности.

1) Не увлажнённая поверхность листьев низкой растительности в данном случае «не работает», т. е. не может испарять, поэтому турбулентный поток водяного пара на этой поверхности равен нулю: $Flux_{v surf}^{turb leaf dry} = 0$.

2) Увлажнённая поверхность листьев низкой растительности в данном случае принимает на себя всю долю потока над поверхностью низкой растительности:

$$Flux_{v surf lowveg}^{turb leaf wet} = Flux_{v surf}^{turb} \cdot \left(FRAC_{lowveg}^{leaf dry} + FRAC_{lowveg}^{leaf wet} \right),$$

$$Flux_{v surf lowveg}^{turb leaf wet} = \min \left\{ Flux_{v surf lowveg}^{turb leaf wet}, \frac{q_{w lowveg}^{max} - q_{w lowveg}}{\Delta t} \right\},$$

где:

$q_{w lowveg}$ — влагосодержание листьев низкой растительности $\left(\frac{K\mathcal{Z}}{M^2} \right)$

$q_{w lowveg}^{max}$ — максимальное значение влагосодержания листьев низкой растительности $\left(\frac{K\mathcal{Z}}{M^2} \right)$,

Δt — величина шага по времени (с).

3) Не увлажнённая поверхность листьев высокой (лесной) растительности в данном случае «не работает», т. е. не может испарять, поэтому турбулентный поток водяного пара на этой поверхности равен нулю: $Flux_{v surf forest}^{turb leaf dry} = 0$.

4) Увлажнённая поверхность листьев высокой (лесной) растительности в данном случае принимает на себя всю долю потока над поверхностью высокой (лесной) растительности:

$$Flux_{v surf forest}^{turb leaf wet} = Flux_{v surf}^{turb} \cdot \left(FRAC_{forest}^{leaf dry} + FRAC_{forest}^{leaf wet} \right),$$

$$Flux_{v surf forest}^{turb leaf wet} = \min \left\{ Flux_{v surf forest}^{turb leaf wet}, \frac{q_{w forest}^{max} - q_{w forest}}{\Delta t} \right\},$$

где:

$q_{w\ forest}$ — влагосодержание листьев высокой (лесной) растительности $\left(\frac{\kappa z}{M^2} \right)$,

$q_{w\ forest}^{max}$ — максимальное значение влагосодержания листьев высокой (лесной) растительности $\left(\frac{\kappa z}{M^2} \right)$.

б) Поток направлен вверх — испарение (возгонка)

$$Flux_{v\ surf}^{turb} < 0$$

1) Не увлажнённая поверхность листьев низкой растительности

Если эвапотраспирация низкой растительности возможна (условия эвапотраспирации см. в главе о параметризации растительности), то

$$Flux_{v\ surf\ lowveg}^{turb\ leaf\ dry} = Flux_{v\ surf}^{turb} \cdot FRAC_{lowveg}^{leaf\ dry},$$

если не возможна, то

$$Flux_{v\ surf\ lowveg}^{turb\ leaf\ dry} = 0.$$

2) Увлажнённая поверхность листьев низкой растительности

$$Flux_{v\ surf\ lowveg}^{turb\ leaf\ wet} = Flux_{v\ surf}^{turb} \cdot FRAC_{lowveg}^{leaf\ wet},$$

$$Flux_{v\ surf\ lowveg}^{turb\ leaf\ wet} = \max \left\{ Flux_{v\ surf\ lowveg}^{turb\ leaf\ wet}, \frac{-q_{w\ lowveg}}{\Delta t} \right\}.$$

3) Не увлажнённая поверхность листьев высокой (лесной) растительности

Если эвапотраспирация высокой растительности возможна (условия эвапотраспирации см. в главе о параметризации растительности), то

$$Flux_{v\ surf\ forest}^{turb\ leaf\ dry} = Flux_{v\ surf}^{turb} \cdot FRAC_{forest}^{leaf\ dry},$$

если не возможна, то

$$Flux_{v\ surf\ forest}^{turb\ leaf\ dry} = 0.$$

4) Увлажнённая поверхность листьев высокой (лесной) растительности

$$Flux_{v\ surf\ forest}^{turb\ leaf\ wet} = Flux_{v\ surf}^{turb} \cdot FRAC_{forest}^{leaf\ wet},$$

$$Flux_{v\ surf\ forest}^{turb\ leaf\ wet} = \max \left\{ Flux_{v\ surf\ forest}^{turb\ leaf\ wet}, \frac{-q_{w\ forest}}{\Delta t} \right\}.$$

После определения этих четырёх составляющих потока, определим «оставшийся» поток, которых приходится на оставшиеся составляющие подстилающей поверхности:

$$Flux_{v\ surf}^{turb\ res} = Flux_{v\ surf}^{turb} - Flux_{v\ surf\ lowveg}^{turb\ leaf\ dry} - Flux_{v\ surf\ lowveg}^{turb\ leaf\ wet} - Flux_{v\ surf\ forest}^{turb\ leaf\ dry} - Flux_{v\ surf\ forest}^{turb\ leaf\ wet}.$$

Распределим его между двумя оставшимися поверхностями: голой почвой и снегом.

5) и 6) Голая почва и снег.

а) Если их суммарная доля ($FRAC_{bare\ soil} + FRAC_{snow}$) равна нулю, то оставшийся поток распределяется между ними до долям без учёта присутствия растительности:

$$Flux_{v\ surf\ soil}^{turb} = Flux_{v\ surf}^{turb\ res} \cdot (1 - F_{snowcover}),$$

$$Flux_{v\ surf\ snow}^{turb} = Flux_{v\ surf}^{turb\ res} \cdot F_{snowcover},$$

где:

$F_{snowcover}$ — общая (для всей ячейки) доля снежного покрова.

б) Если их суммарная доля ($FRAC_{bare\ soil} + FRAC_{snow}$) не равна нулю, то оставшийся поток

распределяется между ними до долям:

$$F_{soil}^* = \frac{FRAC_{bare\ soil}}{FRAC_{bare\ soil} + FRAC_{snow}} , \quad F_{snow}^* = 1 - FRAC_{soil}^*$$

$$Flux_{v\ surf\ soil}^{turb} = Flux_{v\ surf}^{turb\ res} \cdot F_{soil}^* ,$$

$$Flux_{v\ surf\ snow}^{turb} = Flux_{v\ surf}^{turb\ res} \cdot F_{snow}^* .$$

Поток атмосферных осадков на комплексную подстилающую поверхность

Из атмосфера на комплексную подстилающую поверхность выпадают жидкие и твёрдые осадки, их поток (интенсивность), определяются атмосферной моделью: $Flux_{w\ atm}^{liq}$ и $Flux_{w\ atm}^{ice}$. Для того, чтобы распределить их по составляющим подстилающей поверхности примем несколько гипотез:

- твёрдые осадки падают только на поверхность снега (реальную или условную, если её ещё нет и она начинает формироваться),
- жидкие осадки распределяются по составляющим поверхности с их долями, при этом доля листьев равна сумме их увлажнённой и не увлажнённой части, а избыток того, что может удержаться на листьях падает на голую почву и снег.

Жидкие осадки на поверхности листьев низкой растительности:

$$Flux_{w\ atm\ lowveg}^{liq} = Flux_{w\ atm}^{liq} \cdot (FRAC_{lowveg}^{leaf\ dry} + FRAC_{lowveg}^{leaf\ wet}) ,$$

$$Flux_{w\ atm\ lowveg}^{liq} = \min \left\{ Flux_{w\ atm}^{liq} , \frac{q_{w\ lowveg}^{max} - q_{w\ lowveg}}{\Delta t} \right\} .$$

Жидкие осадки на поверхности листьев высокой (лесной) растительности:

$$Flux_{w\ atm\ forest}^{liq} = Flux_{w\ atm}^{liq} \cdot (FRAC_{forest}^{leaf\ dry} + FRAC_{forest}^{leaf\ wet}) ,$$

$$Flux_{w\ atm\ forest}^{liq} = \min \left\{ Flux_{w\ atm}^{liq} , \frac{q_{w\ forest}^{max} - q_{w\ forest}}{\Delta t} \right\} .$$

После определения этих двух составляющих потока, определим «оставшийся» поток, которых приходится на оставшиеся составляющие подстилающей поверхности:

$$Flux_{w\ atm}^{liq\ res} = Flux_{w\ atm}^{liq} - Flux_{w\ atm\ lowveg}^{liq} - Flux_{w\ atm\ forest}^{liq} .$$

Распределим его между двумя оставшимися поверхностями: голой почвой и снегом.

а) Если их суммарная доля ($FRAC_{bare\ soil} + FRAC_{snow}$) равна нулю, то оставшийся поток распределяется между ними до долям без учёта присутствия растительности:

$$Flux_{w\ atm\ soil}^{liq} = Flux_{v\ surf}^{turb\ res} \cdot (1 - F_{snow}) ,$$

$$Flux_{w\ atm\ snow}^{liq} = Flux_{w\ atm}^{liq\ res} \cdot F_{snow} .$$

б) Если их суммарная доля ($FRAC_{bare\ soil} + FRAC_{snow}$) не равна нулю, то оставшийся поток распределяется между ними до долям:

$$F_{soil}^* = \frac{FRAC_{bare\ soil}}{FRAC_{bare\ soil} + FRAC_{snow}} , \quad F_{snow}^* = 1 - FRAC_{soil}^*$$

$$Flux_{w\ atm\ soil}^{liq} = Flux_{w\ atm}^{liq\ res} \cdot F_{soil}^* ,$$

$$Flux_{w\ atm\ snow}^{liq} = Flux_{w\ atm}^{liq\ res} \cdot F_{snow}^* .$$

Твёрдые осадки на поверхности снега:

$$Flux_{w\ atm\ snow}^{ice} = Flux_{w\ atm}^{ice} .$$

Поток общей энтропии между комплексной подстилающей поверхностью и нижним атмосферным уровнем

Поток энтропии, поступающий на комплексную подстилающую поверхность состоит из турбулентного притока энтропии сухого воздуха, турбулентного притока водяного пара, притока энтропии атмосферных осадков и притока энтропии солнечной радиации:

$$Flux_S^{\Sigma} = Flux_{S_{da}\ surf}^{turb} + Flux_{S_{wv}\ surf}^{turb} + Flux_{S_w\ atm} + Flux_{S_i\ atm} + Flux_{S\ rad} ,$$

где:

$$Flux_{S\ surf}^{\Sigma} \text{ — общий поток энтропии на подстилающей поверхности } \left(\frac{Дж}{К\ м^2\ с} \right) ,$$

$$Flux_{S_{da}\ surf}^{turb} \text{ — поток энтропии сухого воздуха, определяемый турбулентным обменом в приповерхностном слое между подстилающей поверхностью и нижним атмосферным уровнем } \left(\frac{Дж}{К\ м^2\ с} \right) ,$$

$$Flux_{S_{wv}\ surf}^{turb} \text{ — поток энтропии водяного пара, определяемый турбулентным обменом в приповерхностном слое между подстилающей поверхностью и нижним атмосферным уровнем } \left(\frac{Дж}{К\ м^2\ с} \right) ,$$

$$Flux_{S_w\ atm} \text{ — поток энтропии воды атмосферных осадков в жидкой фазе на подстилающей поверхности } \left(\frac{Дж}{К\ м^2\ с} \right) ,$$

$$Flux_{S_i\ atm} \text{ — поток энтропии воды атмосферных осадков в твёрдой фазе на подстилающей поверхности } \left(\frac{Дж}{К\ м^2\ с} \right) ,$$

$$Flux_{S\ rad} \text{ — поток энтропии, связанный с потоком солнечной радиации } \left(\frac{Дж}{К\ м^2\ с} \right) :$$

$$Flux_{S\ rad} = \frac{Flux_{rad}}{T_{surf}} ,$$

$$Flux_{rad} \text{ — общий поток солнечной радиации на подстилающей поверхности } \left(\frac{Дж}{м^2\ с} \right) ,$$

$$T_{surf} \text{ — температура комплексной подстилающей поверхности (см. выше) (К).}$$

Рассмотрим отдельные составляющие общего потока энтропии.

Поток энтропии сухого воздуха, определяемый турбулентным обменом в приповерхностном слое между подстилающей поверхностью и нижним атмосферным уровнем определяется так:

$$Flux_{S_{da}\ surf}^{turb} = K_h^{turb} \cdot \rho_{a\ surf} \cdot \frac{S_{da\ surf} - S_{da\ al}}{\Delta z_{al}} ,$$

где:

$$K_h^{turb} \text{ — коэффициент турбулентного обмена теплом в поверхностном слое атмосферы (surface}$$

layer) $\left(\frac{M^2}{c} \right)$,

$\rho_{a\ surf}$ — плотность воздуха $\left(\frac{кг}{м^3} \right)$ на подстилающей (комплексной) поверхности,

$S_{da\ surf}$ — удельная энтропия сухого воздуха $\left(\frac{Дж}{кг\ K} \right)$ на подстилающей (комплексной) поверхности,

$S_{da\ surf}$ — удельная энтропия сухого воздуха $\left(\frac{Дж}{кг\ K} \right)$ на самом нижнем атмосферном уровне,

Δz_{a1} — высота $(м)$ самого нижнего атмосферного уровня над подстилающей поверхностью.

$$S_{da} = q_d \cdot \left[C_p^d \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) - R_d \ln \left(\frac{P_d}{P_0} \right) \right] :$$

S_{da} - удельная энтропия сухого воздуха $\left(\frac{Дж}{кг\ K} \right)$,

q_d — удельная масса сухого воздуха $\left(\frac{кг}{кг} \right)$,

T — температура (K),

P_d — парциальное давление сухого воздуха (Па),

$T_0 = 273.15$ (K) — термодинамическая постоянная,

$P_0 = 10^5$ (Па) — термодинамическая постоянная,

$C_p^d = 1004.6$ $\left(\frac{Дж}{кг\ K} \right)$ — удельная теплоёмкость воздуха при постоянном объёме,

$R_d = 287.05$ $\left(\frac{Дж}{кг\ K} \right)$ — газовая постоянная сухого воздуха.

Зная удельную влажность воздуха на подстилающей поверхности $q_{v\ surf}$ (см. выше) и удельную влажность воздуха на нижнем атмосферном уровне $q_{v\ a1}$, можем определить давление водяного пара на этих уровнях: e_{surf} и e_{a1} , удельную массу сухого воздуха: $q_{da\ surf} = 1 - q_{v\ surf}$ и $q_{da\ a1} = 1 - q_{v\ a1}$, а также давления сухого воздуха: $P_{d\ surf} = P_{surf} - e_{surf}$ и $P_{d\ a1} = P_{a1} - e_{a1}$.

Поток энтропии водяного пара, определяемый турбулентным обменом в приповерхностном слое между подстилающей поверхностью и нижним атмосферным уровнем определяется так:

$$Flux_{S_{wv\ surf}}^{turb} = K_v^{turb} \cdot \rho_{a\ surf} \cdot \frac{S_{wv\ surf} - S_{wv\ a1}}{\Delta z_{a1}},$$

где:

K_v^{turb} — коэффициент турбулентного обмена водяным паром в поверхностном слое атмосферы (surface layer) $\left(\frac{M^2}{c} \right)$,

$\rho_{a\ surf}$ — плотность воздуха $\left(\frac{кг}{м^3} \right)$ на подстилающей (комплексной) поверхности,

$S_{wv\ surf}$ — удельная энтропия водяного пара $\left(\frac{Дж}{кг\ K} \right)$ на подстилающей (комплексной) поверхности,

$S_{wv surf}$ — удельная энтропия водяного пара $\left(\frac{Дж}{кг K} \right)$ на самом нижнем атмосферном уровне,

Δz_{a1} — высота (м) самого нижнего атмосферного уровня над подстилающей поверхностью.

$$S_{wv} = q_v \cdot \left[C_v^d \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) - R_v \ln \left(\frac{e}{e_0} \right) + \frac{L_i^v}{T_0} \right] :$$

S_{wv} - удельная энтропия водяного пара $\left(\frac{Дж}{кг K} \right)$,

q_v — удельная влажность воздуха $\left(\frac{кг}{кг} \right)$,

T — температура (K),

e — парциальное давление водяного пара (Па),

$T_0=273.15$ (K) — термодинамическая постоянная,

$e_0=611$ (Па) — термодинамическая постоянная,

$C_p^v=1869.46$ $\left(\frac{Дж}{кг K} \right)$ — удельная теплоёмкость воздуха при постоянном объёме,

$R_v=461.51$ $\left(\frac{Дж}{кг K} \right)$ — газовая постоянная водяного пара,

$L_i^v=2834170.5$ $\left(\frac{Дж}{кг} \right)$ — удельная теплота фазового перехода лёд / водяной пар.

Зная удельную влажность воздуха на подстилающей поверхности $q_{v surf}$ (см. выше) и удельную влажность воздуха на нижнем атмосферном уровне $q_{v a1}$, можем определить давление водяного пара на этих уровнях: e_{surf} и e_{a1} .

Поток энтропии воды атмосферных осадков жидкой фазы на подстилающей поверхности определяется так:

$$Flux_{S_w atm} = Flux_{w atm}^{liq} \cdot S_w ,$$

где:

$Flux_{w atm}^{liq}$ — поток осадков в жидкой фазе на подстилающей поверхности $\left(\frac{кг}{м^2 c} \right)$,

S_w — удельная энтропия воды $\left(\frac{Дж}{кг K} \right)$ в приповерхностном слое.

$$S_w = C_w \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) + \frac{L_i^w}{T_0} :$$

S_w - удельная энтропия воды $\left(\frac{Дж}{кг K} \right)$,

T — температура (K),

$T_0=273.15$ (K) — термодинамическая постоянная,

$C_w=4186.8$ $\left(\frac{Дж}{кг K} \right)$ — удельная теплоёмкость воды,

$L_i^w=333560.5$ $\left(\frac{Дж}{кг} \right)$ — удельная теплота фазового перехода лёд / вода.

Для определения энтропии воды в приповерхностном слое используем среднюю взвешенную (с некоторыми эмпирическими пропорциями) температуру:

$$T_{sl} = T_{surf} \cdot 0.7 + T_{al} \cdot 0.3 \quad .$$

Поток энтропии воды атмосферных осадков твёрдой фазы на подстилающей поверхности определяется так:

$$Flux_{S_i \text{ atm}} = Flux_{w \text{ atm}}^{ice} \cdot S_i \quad ,$$

где:

$Flux_{w \text{ atm}}^{ice}$ — поток осадков в твёрдой фазе на подстилающей поверхности $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{ с}} \right)$,

S_i — удельная энтропия льда $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг К}} \right)$ в приповерхностном слое.

$$S_i = C_i \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) :$$

S_i - удельная энтропия льда $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг К}} \right)$,

T — температура (К),

$T_0 = 273.15$ (К) — термодинамическая постоянная,

$C_i = C_w / 2 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг К}} \right)$ — удельная теплоёмкость льда.

Для определения энтропии льда в приповерхностном слое используем среднюю взвешенную (с некоторыми эмпирическими пропорциями) температуру:

$$T_{sl} = T_{surf} \cdot 0.7 + T_{al} \cdot 0.3 \quad .$$

Таким образом, определяется общий поток энтропии на комплексной подстилающей поверхности ($Flux_{S \text{ surf}}^{\Sigma}$). Это общий поток необходимо разделить между составляющими комплексной поверхности, которые имеют разные температуры. Этих составляющих всего три:

- поверхность почвы, покрытой низкой растительностью, включая увлажнённые и не увлажнённые листья,
- поверхность снежного покрова,
- поверхность высокой (лесной) растительности, включая увлажнённые и не увлажнённые листья).

Следующие составляющие потока: поток энтропии сухого воздуха, определяемый турбулентным обменом в приповерхностном слое между подстилающей поверхностью и нижним атмосферным уровнем ($Flux_{S_{da \text{ surf}}}^{turb}$) и поток энтропии, связанный с потоком солнечной радиации ($Flux_{S \text{ rad}}$), распределяются между тремя составляющими поверхности по их долям:

$$Flux_{S_{da \text{ soil}}}^{turb} = Flux_{S_{da \text{ surf}}}^{turb} \cdot \left(FRAC_{bare \text{ soil}} + FRAC_{lowveg}^{leaf \text{ dry}} + FRAC_{lowveg}^{leaf \text{ wet}} \right) \quad ,$$

$$Flux_{S_{da \text{ snow}}}^{turb} = Flux_{S_{da \text{ surf}}}^{turb} \cdot FRAC_{snow} \quad ,$$

$$Flux_{S_{da \text{ forest}}}^{turb} = Flux_{S_{da \text{ surf}}}^{turb} \cdot \left(FRAC_{forest}^{leaf \text{ dry}} + FRAC_{forest}^{leaf \text{ wet}} \right)$$

и

$$Flux_{S \text{ rad soil}} = Flux_{S \text{ rad}} \cdot \left(FRAC_{bare \text{ soil}} + FRAC_{lowveg}^{leaf \text{ dry}} + FRAC_{lowveg}^{leaf \text{ wet}} \right) \quad ,$$

$$Flux_{S \text{ rad snow}} = Flux_{S \text{ rad}} \cdot FRAC_{snow} \quad ,$$

$$Flux_{S \text{ rad forest}} = Flux_{S \text{ rad}} \cdot \left(FRAC_{forest}^{leaf \text{ dry}} + FRAC_{forest}^{leaf \text{ wet}} \right) \quad .$$

Оставшиеся составляющие общего потока энтропии на подстилающей поверхности: поток энтропии водяного пара, определяемый турбулентным обменом в приповерхностном слое между

подстилающей поверхностью и нижним атмосферным уровнем ($Flux_{S_{wv} surf}^{turb}$), поток энтропии воды атмосферных осадков в жидкой ($Flux_{S_w atm}$) и твёрдой ($Flux_{S_i atm}$) фазах на подстилающей поверхности распределяются между тремя составляющими поверхности с соответствии с тем, как были распределены потоки водяного пара, жидких и твёрдых осадков на этих поверхностях (см. выше).

Определяем доли в потоке водяного пара:

$$F_{flux wv soil} = \frac{Flux_{v surf soil}^{turb} + Flux_{v surf lowveg}^{turb leaf dry} + Flux_{v surf lowveg}^{turb leaf wet}}{Flux_{v surf}^{turb}},$$

$$F_{flux wv snow} = \frac{Flux_{v surf snow}^{turb}}{Flux_{v surf}^{turb}},$$

$$F_{flux wv forest} = \frac{Flux_{v surf forest}^{turb leaf dry} + Flux_{v surf forest}^{turb leaf wet}}{Flux_{v surf}^{turb}}.$$

Тогда поток энтропии водяного пара определяемый турбулентным обменом в приповерхностном слое между подстилающей поверхностью и нижним атмосферным уровнем, распределяется между тремя составляющими поверхности в соответствии с этими долями:

$$Flux_{S_{wv} soil}^{turb} = Flux_{S_{wv} surf}^{turb} \cdot F_{flux wv soil},$$

$$Flux_{S_{wv} snow}^{turb} = Flux_{S_{wv} surf}^{turb} \cdot F_{flux wv snow},$$

$$Flux_{S_{wv} forest}^{turb} = Flux_{S_{wv} surf}^{turb} \cdot F_{flux wv forest}.$$

Если поток водяного пара нулевой, то

$$Flux_{S_{wv} soil}^{turb} = Flux_{S_{wv} snow}^{turb} = Flux_{S_{wv} forest}^{turb} = 0.$$

Таким же образом распределяются потоки энтропии, связанные с притоком атмосферных осадков:

Определяем доли в потоке водяного пара:

$$F_{flux w soil}^{liq} = \frac{Flux_{w atm soil}^{liq} + Flux_{w atm lowveg}^{liq}}{Flux_{w atm}^{liq}},$$

$$F_{flux w snow}^{liq} = \frac{Flux_{w atm snow}^{liq}}{Flux_{w atm}^{liq}},$$

$$F_{flux w forest}^{liq} = \frac{Flux_{w atm forest}^{liq}}{Flux_{w atm}^{liq}},$$

$$Flux_{S_w atm soil} = Flux_{S_w atm} \cdot F_{flux w soil}^{liq},$$

$$Flux_{S_w atm snow} = Flux_{S_w atm} \cdot F_{flux w snow}^{liq},$$

$$Flux_{S_w atm forest} = Flux_{S_w atm} \cdot F_{flux w forest}^{liq}.$$

Если поток жидких осадков нулевой, то

$$Flux_{S_w atm soil} = Flux_{S_w atm snow} = Flux_{S_w atm forest} = 0.$$

Поскольку осадки твёрдой фазы поступают только на поверхность снега, то поток энтропии, связанный с этим потоком, направляется только на поверхность снега:

$$Flux_{S_i atm snow} = Flux_{S_i atm}.$$

Наконец, мы можем определить суммарный поток энтропии над каждой из трёх типов

комплексной подстилающей поверхности:

$$\begin{aligned}
 Flux_{S \text{ soil}}^{\Sigma} &= Flux_{S_{da} \text{ soil}}^{turb} + Flux_{S_{wv} \text{ soil}}^{turb} + Flux_{S_w \text{ atm soil}} + Flux_{S \text{ rad soil}} , \\
 Flux_{S \text{ snow}}^{\Sigma} &= Flux_{S_{da} \text{ snow}}^{turb} + Flux_{S_{wv} \text{ snow}}^{turb} + Flux_{S_w \text{ atm snow}} + Flux_{S_i \text{ atm snow}} + Flux_{S \text{ rad snow}} , \\
 Flux_{S \text{ forest}}^{\Sigma} &= Flux_{S_{da} \text{ forest}}^{turb} + Flux_{S_{wv} \text{ forest}}^{turb} + Flux_{S_w \text{ atm forest}} + Flux_{S \text{ rad forest}} .
 \end{aligned}$$

Подводя итог, отметим, что с на комплексной подстилающей поверхности выделяются 6 составляющих, имеющих разную влажность воздуха и 3 составляющих, имеющих разную температуру. Поэтому общий поток воды над комплексной подстилающей поверхностью разделяются на 6 составляющих, которые используются для прогноза влагосодержания в 6 (условно) резервуарах воды, а общий поток энтропии разделяется на 3 составляющие, которые используются для прогноза температуры в 3 средах.