

# Модификация почвенно-снежного блока климатической модели ИВМ РАН

А. Ю. Черненко<sup>1</sup>, С. В. Кострыкин<sup>2-4</sup>, Е. М. Володин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный  
исследовательский университет)

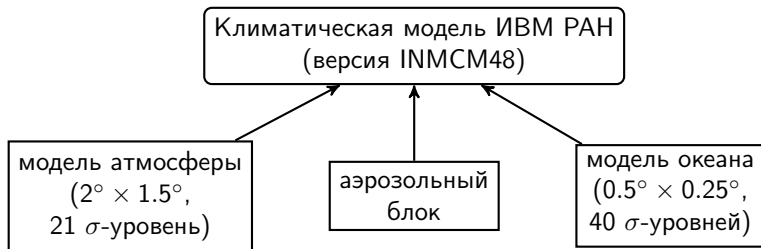
<sup>2</sup>Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН

<sup>3</sup>Институт глобального климата и экологии им. Ю. А. Израэля

<sup>4</sup>Институт физики атмосферы им. А. М.Обухова РАН

24 ноября 2021 г.

- Отсутствие в модели климата ИВМ РАН переменных, необходимых для более точного моделирования альbedo заснеженной поверхности
- Отсутствие учета водосодержания слоя снега
- Отсутствие учета перемерзания талой воды в переходные сезоны
- Отсутствие описания эволюции плотности снега



- Версия модели INMCM5<sup>1</sup> участвует в международном проекте по сравнению климатических моделей CMIP6 (Coupled Models Intercomparison Project)

---

<sup>1</sup>Volodin, Evgeny and Mortikov, Evgeny and Kostyrykin, Sergey and Galin, V. and Lykossov, Vasily and Gritsun, Andrey and Diansky, Nikolay and Gusev, Anatoly and Iakovlev, Nikolay. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5. Climate Dynamics, 2017, Vol. 49.

# Описание исходной версии почвенно-снежного блока модели

- Водно-эквивалентная толщина слоя снега вычисляется на основании уравнения баланса<sup>2</sup>:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = P - M - \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{L} \cdot \rho_w}$$

- Процесс таяния начинается, когда температура подстилающей поверхности становится больше 0 °С, при этом весь растаявший снег, а также возможный дождь, поступают сразу на поверхность почвы
- Плотность снега считается постоянной:  $\rho_{snow} = 0.185 \text{ г/см}^3$

---

<sup>2</sup>Володина, Бенгтссон, Лыкосов, Параметризация процессов тепло-влажноперевода в снежном покрове для моделирования сезонных вариаций гидрологического цикла суши, Метеорология и гидрология., 2000, Т. 10, № 5.

# Описание модификаций почвенно-снежного блока

- Проводится расчет теплового баланса на поверхности без учета фазовых переходов
- В случае фазовых переходов избыток энергии в тепловом балансе тратится на таяние снега, а дефицит восполняется за счет перемерзания талой воды
- При таянии снега вода не уходит моментально на верхнюю границу почвы, а сочится сквозь толщу снега
- В слое снега может содержаться воды не больше критического значения<sup>3</sup>:

$$S_{wat}^{max} = S \cdot \left( \frac{\varepsilon_{sn}}{1 - \varepsilon_{sn}} \right)$$

( $S$  – водно-эквивалентная высота снежного покрова,  $\varepsilon_{sn}$  – его пористость)

- Пористость снега<sup>4</sup> определяется с его плотностью:

$$\varepsilon_{sn} = 0.11 \cdot \left( \frac{\rho_w}{\rho_{sn}} - 1 \right)$$

---

<sup>3</sup> Gusev Y. M., Nasonova O. N., The simulation of heat and water exchange at the land-atmosphere interface for the boreal grassland by the land-surface model SWAP, Hydrological Processes., 2002, Vol. 16, no. 10, P. 1893–1919.

<sup>4</sup> Кучмент, Демидов, Мотовилов, Формирование речного стока. Физико-математические модели, Под ред. С. В. Музылева., Наука, Москва, 1983, Т. 216.

# Алгоритм для вычисления водно-эквивалентной толщины снежного слоя

если  $\Delta E > 0$ ,  $T_{sn} = 0$  °C и  $S_{sn}^{n-1} > 0$  то

$$M = \frac{\Delta E}{\lambda}, \quad \delta = \frac{S_{sn}^{n-1}}{S_{sn}^{n-1} + S_{frz}^{n-1}}; // \text{ талая вода и доля обычного снега в слое}$$

$S_{sn}^n = S_{sn}^{n-1} + P - \Delta t \left( \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{L} \cdot \rho_w} + \delta \cdot M \right)$ ,  $S_{wat}^{max} = f(S_{sn}^n)$ ; // обычный снег и предельное влагосодержание

$$S_{frz}^n = S_{frz}^{n-1} - \Delta t(1 - \delta)M; // \text{ перемерзший снег}$$

$\Delta S_{wat} = \max\{\Delta t \cdot M, S_{wat}^{max}\}$ ,  $M_{soil} = \max\{\Delta t \cdot M - S_{wat}^{max}, 0\}$ ; // разделение талой воды на "пористую" и "почвенную"

$$S_{wat}^n = S_{wat}^{n-1} + \Delta S_{wat} // \text{ талая вода в снежных порах}$$

иначе

если  $S_{sn}^{n-1} > 0$ ,  $S_{wat}^{n-1} > 0$  и  $T_{sn} = 0$  °C то

$$S_{sn}^n = S_{sn}^{n-1} + P - \Delta t \left( \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{L} \cdot \rho_w} \right); // \text{ обычный снег}$$

$$F = -\frac{\Delta E}{\lambda}, \quad S_{wat}^n = \max\{S_{wat}^{n-1} - \Delta t \cdot F, 0\}; // \text{ талая вода в снежных порах}$$

$$S_{frz}^n = S_{frz}^{n-1} + (S_{wat}^{n-1} - S_{wat}^n); // \text{ перемерзший снег}$$

завершим если

завершим если

$$S^n = S_{sn}^n + S_{wat}^n + S_{frz}^n; // \text{ весь снежный слой целиком}$$

Слой снега может включать в себя:

- лежалый снег
- свежесвыпавший снег
- талую воду
- перемерзший снег

Плотность всего снежного слоя оценивается как среднее взвешенное по всем фракциям:

$$\rho_{snow} = \rho_{old} \cdot \delta_{old} + \rho_{new} \cdot \delta_{new} + \rho_w \cdot \delta_{wat} + \rho_{ice} \cdot \delta_{frz}$$

$\rho_{old}$  – плотность лежалого снега,

$\rho_{new} = 0.1 \text{ г/см}^3$  – плотность свежесвыпавшего снега,

$\rho_w = 1 \text{ г/см}^3$  – плотность воды,

$\rho_{ice} = 0.917 \text{ г/см}^3$  – плотность льда,

$\delta_{old}$ ,  $\delta_{new}$ ,  $\delta_{wat}$ ,  $\delta_{frz}$  – массовые доли старого и свежего снега, талой воды, а также перемерзшего снега соответственно

Плотность лежалого снега можно рассчитать на основании эволюционного уравнения из модели SWAP<sup>5</sup>:

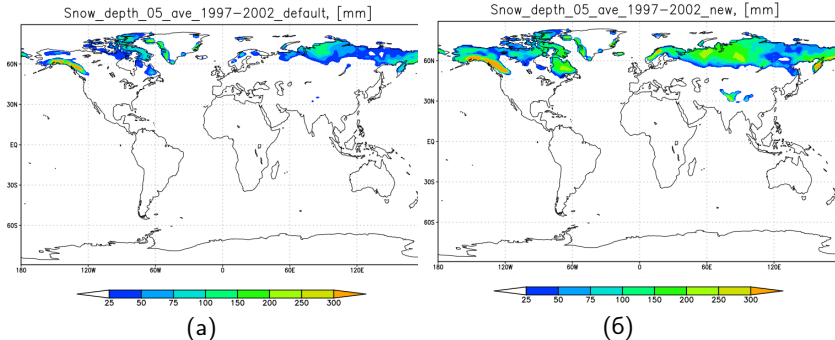
$$\rho_{sn}(\tau_i) = \rho_{sn}(\tau_{i-1}) \cdot \left[ 1 + 0.1 \cdot H_{sn}(\tau_{i-1}) \cdot e^{0.08 \cdot T_{sn} - 21 \cdot \rho_{sn}(\tau_{i-1})} \right]$$

Здесь  $H_{sn}$  – водно-эквивалентная толщина слоя снега [см], плотность снега  $\rho_{sn}$  [г/см<sup>3</sup>], температура слоя снега  $T_{sn}$  [°C], шаг по времени  $\tau_i - \tau_{i-1} = 1$  сутки

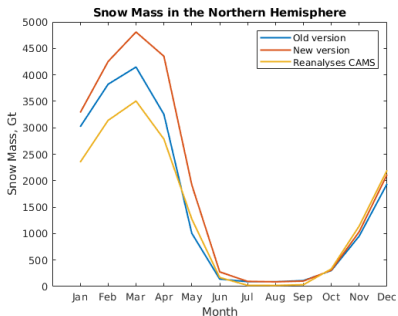
---

<sup>5</sup>Gusev Y. M., Nasonova O. N., The simulation of heat and water exchange at the land–atmosphere interface for the boreal grassland by the land-surface model SWAP, Hydrological Processes., 2002, Vol. 16, no. 10, P. 1893–1919.

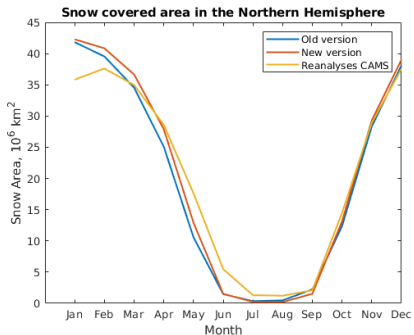




Среднемесячная водно-эквивалентная толщина слоя снега по данным (а) исходной и (б) модифицированной версии модели ИВМ (месяц – май)



(a)



(б)

Годовой ход (а) массы снега и (б) площади, покрытой им, осредненные за 1997-2002 годы по данным исходной и модифицированной версий модели, и по данным реанализа CAMS

- Модифицирована процедура расчета высоты снежного покрова в климатической модели ИВМ РАН
- Уточнены сроки схода снежного покрова в средних и/или высоких широтах<sup>6</sup>
- Полученную версию модели можно использовать совместно с моделью расчета альбедо заснеженной поверхности, учитывающей метаморфизм снега, а также для оценки дополнительного радиационного форсинга от загрязнения снега атмосферными аэрозолями

---

<sup>6</sup>Речь идет о среднеклиматических характеристиках, так как сроки схода снега и другие параметры снежного покрова имеют значительную межгодовую изменчивость

Спасибо за внимание!