

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ АЛЬБЕДО СНЕГА В ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ НА СРЕДНЕСРОЧНЫЕ И ДОЛГОСРОЧНЫЕ ЧИСЛЕННЫЕ ПРОГНОЗЫ

М.А. Толстых

*Институт вычислительной математики РАН;
Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации
tolstykh@inm.ras.ru*

Изменения в альbedo снега, вызванные выпадением аэрозоля, такого как пыль и сажа (в английской литературе называемый «черный углерод»), и уплотнением лежалого снега, могут значительно модифицировать поток солнечного излучения на поверхности суши. Это, в свою очередь, существенно влияет на приземную температуру. Уже давно была признана важность параметризации альbedo снега (см., например, [10, 5]). Наиболее полно процессы в снежном покрове, в том числе эволюцию альbedo, описывают многослойные сложные модели, учитывающие изменения в зернах снега, отложения сажи и пыли (например, [12]). Точное моделирование процессов в снежном покрове над северной Евразией дополнительно осложняется тем, что в северной части России существуют заметные стационарные источники аэрозоля, вызванные высоким загрязнением воздуха в некоторых городах и сжиганием попутного нефтяного газа. Данные измерений этого аэрозоля весьма редки, и существуют лишь единичные наблюдения, доступные в режиме реального времени (например, AERONET). Климатологическое распределение аэрозоля (например, по данным спутниковых наблюдений, таких как архив GISS) применять в оперативном прогнозе

невозможно, поскольку сжигание попутного нефтяного газа постепенно уменьшается в течение прошлых десяти лет, также постепенно уменьшается загрязнение воздуха в некоторых городах и поселках на севере России.

С физической точки зрения, альbedo снега различно в различных спектральных интервалах видимой и ультрафиолетовой частей спектра (см. например, [8]). В большинстве моделей численного прогноза погоды мы можем применять только относительно простые модели снега, и в частности его альbedo. Как правило, в моделях атмосферы применяется единое значение альbedo снега для всех спектральных интервалов. Такая параметризация также называется «широкополосное альbedo».

Ранее большее влияние изменений в параметризации альbedo снега на сезонные прогнозы, рассчитываемые моделью ПЛАВ, было продемонстрировано А.Ю. Юровой (частное сообщение). В данной работе мы испытываем несколько существующих параметризаций альbedo снега в рамках глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ [1], используемой в Гидрометцентре России для оперативных среднесрочных прогнозов и в качестве компонента системы вероятностных сезонных прогнозов.

Обзор подходов к параметризации альbedo снега

В моделях атмосферы, предназначенных для моделирования изменений климата и численного прогноза погоды, исторически применялись различные параметризации альbedo снега. В климатических моделях часто применяется относительно простая зависимость альbedo снега только от температуры. Например, в модели атмосферы Института Макса Планка ЕСНАМ применяется следующая параметризация [11]: при температуре поверхности $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше альbedo снега полагается равным 0,3; при температуре поверхности $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже альbedo снега равно 0,8, при температуре поверхности между -5 и $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ альbedo снега линейно интерполируется между этими значениями.

В моделях атмосферы, предназначенных для численного прогноза погоды, изменение структуры снега по мере его

слеживания пытаются учитывать с помощью введения зависимости альbedo снега от его возраста и температуры (для случая тающего снега зависимость отличается от зависимости при температуре ниже $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Также различают изменение альbedo при положительных и отрицательных температурах поверхности. Например, в старой параметризации снежного покрова Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) [7] альbedo снега α_{sn} на новом шаге по времени $(t + \Delta t)$ линейно уменьшается при отрицательных температурах и экспоненциально уменьшается до предельного значения α_{\min} при положительных температурах:

$$\alpha_{sn}^{t+\Delta t} = \begin{cases} \alpha_{sn}^t - \tau_a \Delta t / \tau_1 \\ \left(\alpha_{sn}^t - \alpha_{\min} \right) \exp(-\tau_f \Delta t / \tau_1) + \alpha_{\min} \end{cases} \quad (1)$$

Эта схема была предложена ранее в [14]; здесь Δt – величина шага по времени; индексы t и $t + \Delta t$ обозначают текущий и новый шаг по времени соответственно; коэффициенты τ с различными индексами определяют время релаксации альbedo. Для свежевыпавшего снега применяется скачкообразное изменение альbedo снега до значения α_{\max} при выпадении свежего снега более определенной пороговой величины (часто – 1 мм в водном эквиваленте). Этот порог не имеет физического смысла и играет роль настроочного параметра схемы. Типичными значениями α_{\min} и α_{\max} являются, соответственно, 0,5 и 0,85. Такая параметризация альbedo снега применяется во многих моделях. В работах [10] и [7] отмечается искусственность мгновенного присваивания текущего значения альbedo снега при снегопаде равным его значению для свежевыпавшего снега. Действительно, из повседневных наблюдений мы знаем, что изменение цвета снега (определяющего его альbedo) при снегопаде происходит не скачком, а постепенно, по мере выпадения снега. Поэтому в работе [7] было предложено заменить мгновенное скачкообразное изменение альbedo снега при выпадении снега на релаксацию, следуя формуле:

$$\alpha_{sn}^{t+1} = \alpha_{sn}^t + \min\left(1, \frac{F\Delta t}{10}\right) (\alpha_{\max} - \alpha_{sn}^t). \quad (2)$$

Здесь F – скорость выпадения снега на данном шаге по времени, кг/(м²·с).

Во всех моделях можно также учесть дополнительные эффекты, например, изменения зенитного угла Солнца [6], влияния отражения от облаков [9]. Учет изменения зенитного угла Солнца описывается следующим образом:

$$\alpha = \alpha_0 + \max\left\{0; 0,32 \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{3}{1 + 4 \cos \theta_z} - 1 \right] \right\},$$

$$\cos \theta_z = \max(\cos 80^\circ, \cos \theta_z).$$

Эта коррекция применяется, когда зенитный угол солнца θ_z более 60 градусов.

Глобальная модель атмосферы

Мы испытывали различные схемы параметризации альbedo снега в рамках глобальной модели атмосферы ПЛАВ, как на среднесрочных прогнозах погоды, так и на ансамблевых долгосрочных прогнозах. Модель ПЛАВ разработана в Институте вычислительной математики РАН и Гидрометцентре России и состоит из блока решений уравнений гидротермодинамики атмосферы собственной разработки [1] и набора параметризаций неадиабатических процессов подсеточного масштаба, разработанных международным консорциумом ALADIN/LACE [13]. Динамический блок модели ПЛАВ применяет традиционный для глобальных негидростатических моделей прогноза погоды полулагранжев полунявный алгоритм. Отличительными особенностями этого блока являются применение вертикального компонента абсолютной завихренности в качестве прогностической переменной, а также широкое использование конечных разностей четвертого порядка на несмещенной сетке. Модель ПЛАВ (с горизонтальным разрешением 0,9×0,72°) является основной оперативной моделью, используемой для глобальных

среднесрочных прогнозов. Кроме того, модель ПЛАВ применяется оперативно в качестве компонента системы вероятностного долгосрочного прогноза. Версия модели ПЛАВ для долгосрочных прогнозов имеет горизонтальное разрешение $1,4 \times 1,125^\circ$ по долготе и широте соответственно, 28 сигма-уровней по вертикали. Оценки ошибок модели на ансамблевых долгосрочных прогнозах приведены в [4, 3]. В последние годы разработана новая версия модели ПЛАВ, имеющая горизонтальное разрешение 20–25 км и 51 вертикальный уровень. Эта версия модели также включает в себя более сложные, усовершенствованные параметризации процессов подсеточного масштаба. Например, учитываются микрофизические процессы в облаках неконвективного характера, соответственно, модель включает в себя уравнения переноса четырех фракций гидрометеоров. Именно с помощью этой версии модели в данной работе исследовалось влияние изменения схемы параметризации альbedo снега на среднесрочные прогнозы погоды.

Численные эксперименты с моделью ПЛАВ

Нами были выполнены численные эксперименты по расчету ансамблевых сезонных прогнозов на основе архивных данных реанализа NCEP/NCAR-2 отдельно для зимнего и весеннего периода Северного полушария за период 1983–2010 гг. Мы проверяли важность учета дополнительных факторов в схеме описания альbedo снега, таких как изменение зенитного угла Солнца и отражение от облаков. Оказалось, что учет отражения от облаков, следуя [8], практически не влияет на результаты сезонных прогнозов, в то время как учет изменения зенитного угла Солнца, следуя [6], слегка уменьшает ошибки. Во всех дальнейших экспериментах мы использовали коррекцию альbedo снега за счет изменений зенитного угла Солнца.

Далее мы сравнили две параметризации альbedo снега:

1. Схема описывается уравнениями (1) и применяет скачкообразный «сброс» альbedo на его значение для свежевыпавшего снега α_{\max} при снегопаде более 1 мм водного эквивалента снега. Далее такую схему мы будем называть «старой».

2. Новая схема. Она отличается от старой тем, что в областях севернее 60 градуса южной широты вместо скачкообразного изменения альbedo снега применяется релаксация согласно формуле (2).

Мы рассчитывали как ансамблевые сезонные прогнозы, так и среднесрочные прогнозы на 5 суток.

Среднесрочные прогнозы рассчитывались за период декабрь 2013 г. – март 2014 г. с помощью новой версии модели ПЛАВ с горизонтальным разрешением 20–25 км. Эта модель атмосферы с различными параметризациями альbedo снега применялась не только в прогнозах, но и в процессе подготовки начальных данных для прогнозов по технологии «квазиусвоения» [2]. В результате сравнения ошибок прогнозов (в том числе прогнозов приземной температуры) не было выявлено существенных отличий между результатами для старой и новой параметризаций.

Сезонные прогнозы на основе архивных данных реанализа NCEP/NCAR-2 отдельно для зимнего и весеннего периода Северного полушария за период 1983–2010 гг. рассчитывались на основе ансамбля из 10 участников. В качестве начальных данных ансамбля в свободной атмосфере брались данные реанализа NCEP/NCAR2 со сдвигом в 12 часов, за период со срока 00 ч ВСВ 26 числа по срок 12 ч ВСВ 30 числа месяца, предшествующего первому месяцу прогноза (итого 10 участников ансамбля). При обработке данные расчетов за конец предшествующего месяца исключались. По рассчитанным 4-месячным прогнозам была оценена точность воспроизведения средней атмосферной циркуляции за второй-четвертый месяцы (например, сезонные прогнозы на зимний период стартовали с начальных данных за конец октября). Оценки точности воспроизведения атмосферной циркуляции (средняя и среднеквадратическая ошибки, коэффициент пространственной корреляции отдельно по всему Земному шару, по тропикам, по внетропическим частям Северного и Южного полушария), полученные моделью ПЛАВ с новой схемой параметризации альbedo снега, сравнивались с результатами аналогичных расчетов для старой схемы параметризации альbedo снега. На рис. 1 и 2 представлены среднеквадратические ошибки

сезонных прогнозов по архивным данным для зимнего и весеннего сезонов соответственно, на рис. 3 и 4 – средние ошибки тех же прогнозов.

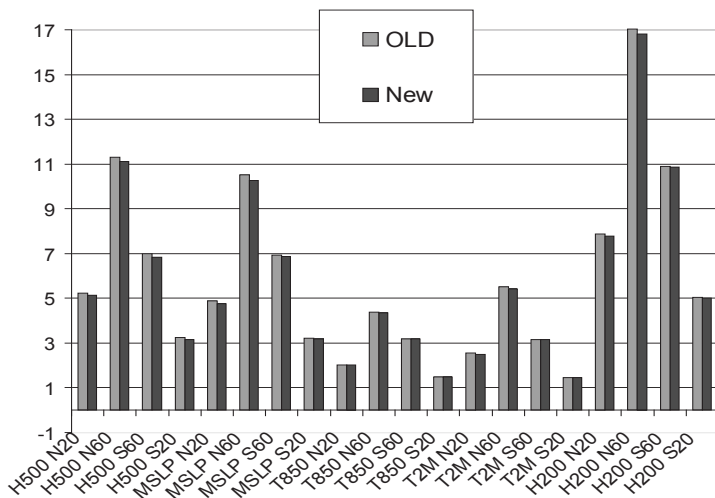


Рис. 1. Сравнение исторических прогнозов при использовании старой (OLD) и новой (New) схемы параметризации альbedo снега. Зимний сезон.

Среднеквадратические ошибки полей высоты поверхности 500 гПа (H500, дам), давления на уровне моря (MSLP); температуры на поверхности 850 гПа (T850, °C), температуры на уровне 2м (T2м, °C), высоты поверхности 200 гПа (H200, дам) по отношению к полям реанализа, осредненные по всем сезонным прогнозам за 28 лет (1983–2010 гг.). S20 – внетропическая часть Южного полушария (90° – 20° ю.ш.), N20 – внетропическая часть Северного полушария (20° – 90° с.ш.), S60 – приполярная часть Южного полушария (90° – 60° ю.ш.), N60 – приполярная часть Северного полушария (60° – 90° с.ш.).

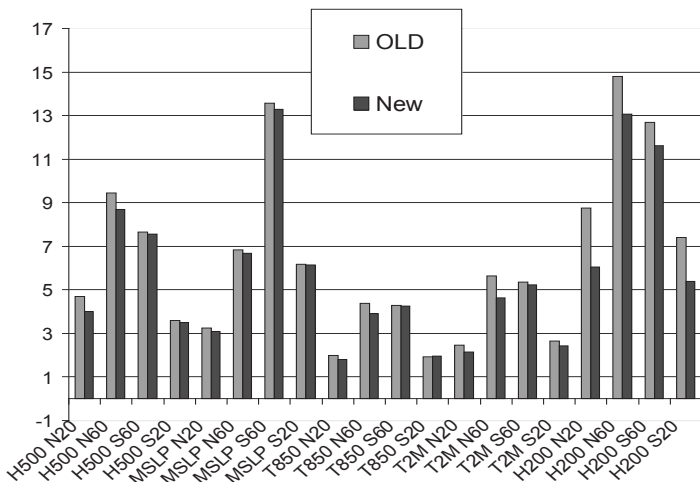


Рис. 2. Среднеквадратические ошибки ретропрогнозов за 1983-2010 гг., стартующих с 1 февраля каждого года. OLD – старая схема параметризации альbedo снега, New – новая. Обозначения и единицы – как на рис. 1.

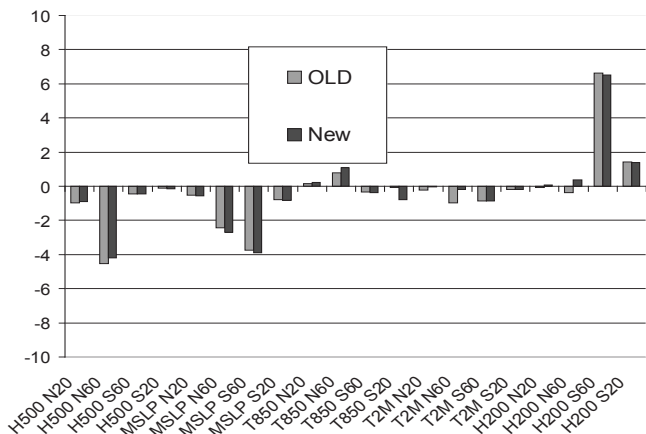


Рис. 3. Средние ошибки ретропрогнозов за 1983-2010 гг., стартующих с 1 ноября каждого года. OLD – старая схема параметризации альbedo снега, New – новая. Обозначения и единицы – как на рис. 1.

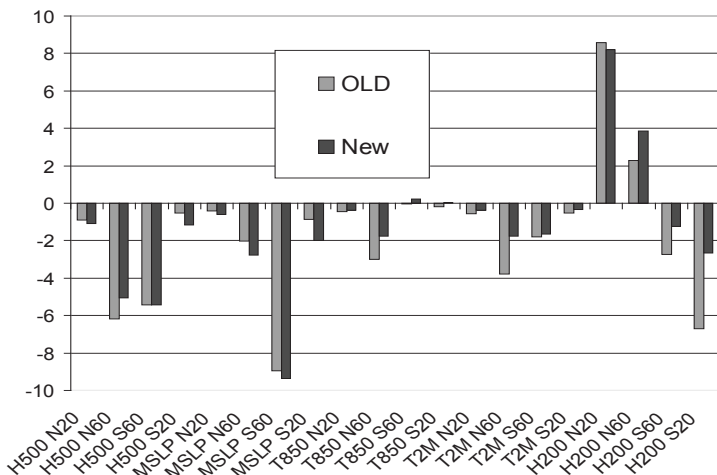


Рис. 4. Средние ошибки ретропрогнозов за 1983–2010 гг., стартующих с 1 февраля каждого года. OLD – старая схема параметризации альbedo снега, New – новая. Обозначения и единицы – как на рис.1.

Мы видим, что новая схема параметризации альbedo снега существенно уменьшила средние и среднеквадратические ошибки среднесезонной приземной температуры и, в меньшей степени, высоты поверхности 500 и 200 гПа для весеннего сезона в приполярных широтах Северного полушария. Влияние новой параметризации для зимнего сезона оказалось незначительным.

Заклучение

В данной работе изучено влияние параметризации альbedo снега на среднесрочные и долгосрочные численные прогнозы глобальной модели атмосферы ПЛАВ. Модификация параметризации альbedo снега в наших экспериментах не оказала существенного влияния на среднесрочные прогнозы погоды, однако для долгосрочных прогнозов отмечено значимое влияние этой параметризации. На основе ансамблевых сезонных прогнозов по архивным данным за период 1983–2010 гг. с помощью

глобальной модели атмосферы ПЛАВ можно сделать следующие выводы.

Учет облачности в параметризации альbedo снега не имеет значимого эффекта. Учет зенитного угла солнца имеет малое положительное влияние (на уровне статистической значимости). В Северном полушарии замена схемы [7] схемой [14], используя [7] южнее 60° ю.ш., значимым образом уменьшает ошибки ансамблевых прогнозов по архивным данным на весенний период в приполярных широтах, особенно приземной температуры, но также и геопотенциала. Та же самая схема слабо положительно влияет на ошибки долгосрочных прогнозов на зимний сезон. В Южном полушарии влияние модификации схемы параметризации альbedo незначительно.

Планируется модификация других компонентов схемы параметризации снега. В частности, планируется изменить схему параметризации пропорции снежного покрова в ячейке сетки, плотности снега; в перспективе намечается реализация многослойной модели эволюции снежного покрова.

Работа выполнена в ИВМ РАН при поддержке гранта РФФИ 14-27-00126.

Список использованных источников

1. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. – М.-Обнинск: ОАО ФООП, 2010. – 111 с.
2. Толстых М.А., Богословский Н.Н., Шляева А.В., Мизяк В.Г. Оперативная технология расчета глобальных прогнозов с помощью полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 170–180.
3. Толстых М.А., Дианский Н.А., Гусев А.В., Киктев Д.Б. Некоторые результаты воспроизведения сезонных аномалий атмосферной циркуляции с помощью совместной модели // Известия РАН, серия ФАО. – 2014. – Т. 50, № 2. – С. 131–142.
4. Толстых М.А., Киктев Д.Б., Зарипов Р.Б., Зайченко М.Ю., Шашкин В.В. Воспроизведение сезонной атмосферной циркуляции модифицированной полулагранжевой модели атмосферы // Известия РАН, серия ФАО. – 2010. – Т. 46, № 2. – С. 149–160.

5. Brun E., David P., Sudul M., Brunot G. A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting // *J. Glaciol.* – 1992. – V. 38. – P. 13–22.

6. Dickinson R.E., Henderson-Sellers A., Kennedy P.J., Wilson M.F. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model. – 1986. – Tech. Note 275, NCAR, Boulder, CO.

7. Dutra E., Balsamo G., Viterbo P., Miranda P., Beljaars A., Schar C., Elder L. An Improved Snow Scheme for the ECMWF Land Surface Model: Description and Offline Validation // *J. Hydrometeorology.* – 2010. – Vol. 11. – P. 899

8. Gardner A.S., Sharp M.J. A review of snow and ice albedo and the development of a new physically based broadband albedo parameterization // *J. Geophys. Res.* – 2010. – F01009.

9. Greuell W, Konzelmann T. Numerical modeling of the energy balance and the englacial temperature of the Greenland Ice Sheet: Calculations for the ETH-Camp Location (west Greenland, 1155 m a.s.l.) // *Global Planet. Change.* – 1994. – Vol. 9. – P. 91–114.

10. Pirazzini R. Challenges in snow and ice albedo parameterisations // *Geophysica.* – 2009. – Vol. 45. – P. 41–62.

11. Roeckner E. et al. The atmospheric general circulation model ECHAM-5: model description. – Hamburg, Germany: Max-Planck Institute for Meteorology Report, 2003. – No. 349. – 140 p.

12. Samuelsson P. Modelling of snow in NWP and climate models. – 2009. – Available at

http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.15052!Samuelsson_SMHI_27jan2011.pdf

13. De Troch R., Hamdi R., Van de Vyver H., Geleyn J.-F., Termonia P. Multiscale Performance of the ALARO-0 Model for Simulating Extreme Summer Precipitation Climatology in Belgium // *J. Climate.* – 2013. – Vol. 26. – P. 8895–8915.

14. Verseghy D.L. CLASS—A Canadian land surface scheme for GCMs. I. Soil mode 1 // *Int. J. Climatol.* – 1991: – Vol. 11. – P. 111–133.

Поступила в редакцию 16.09.2014 г.