

*Е.В. Казакова, И.А. Розинкина, Е.Е. Мачульская*

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ НОВОЙ СХЕМЫ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В УСЛОВИЯХ ВЕСЕННЕГО ТАЯНИЯ СНЕГА В МОДЕЛИ COSMO-RU**

### **Введение**

В настоящее время отмечается возрастающий интерес к развитию описаний «подсеточных» процессов для прогностических моделей атмосферы. В частности, это можно объяснить возросшими «потребительскими» требованиями к успешности прогнозов элементов погоды (в первую очередь температуры и осадков), вырабатываемых современными моделями с высоким пространственно-временным разрешением. С другой стороны, степень реалистичности моделируемых погодных характеристик является индикатором правильности работы всего комплекса параметризаций. Например, корректное описание теплообмена воздуха с подстилающей поверхностью обуславливает правильность воспроизведения всей структуры приземного и пограничного слоев атмосферы и, следовательно, пространственного распределения температуры воздуха, осадков, характеристик конвекции и т.д.

При моделировании процессов на поверхности суши, в конечном счете определяющих процессы теплообмена с атмосферой, математическое описание состояния и эволюции снежного покрова представляет собой сложную задачу, причем со значительной долей неопределенности значений отдельных параметров.

В настоящей статье представлены результаты анализа работы новой схемы параметризации снежного покрова (авторы – В.Н. Лысков, Е.Е. Мачульская [2, 3, 7]), включенной в модель деятельного

слоя суши TERRA (автор – E. Heise [4, 5, 6]) в рамках мезомасштабной модели атмосферы COSMO, в сравнении с результатами традиционно использовавшейся в рамках TERRA схемы снежного покрова с меньшим количеством явно описанных процессов.

Численные эксперименты были выполнены для периода весенне-го снеготаяния 2009 года Европейской территории России (ЕТР). Одной из целей работы была попытка наметить наиболее важные направления для дальнейшего усовершенствования схемы параметризации.

Внимание к периоду снеготаяния объясняется тем, что именно в это время процессы преобразования снега внутри покрова наиболее ярко выражены. С другой стороны, именно в этот период ошибки воспроизведения в моделях атмосферы значений приземной температуры воздуха, напрямую связанные с правильностью описания состояния подстилающей поверхности, оказываются наибольшими.

### **1. Сведения о структуре модели деятельного слое суши TERRA, включая алгоритмы описания снежного покрова**

В мезомасштабной модели атмосферы COSMO [4] описание процессов на поверхности суши выполняется моделью деятельного слоя суши TERRA, которая представляет собой многоуровневую модель почвы, покрытой слоем растительности или снега. Тип почвы, постоянные и текущие характеристики растительности и снега задаются в качестве начальных полей для узлов сетки модели атмосферы. Новая схема параметризации снега была включена именно в этот блок, заменив более простую схему, явным образом не учитывающую целый ряд факторов.

Остановимся на тех особенностях алгоритма модели TERRA и схем снежного покрова (новую схему будем называть «EM», а традиционную – «EN», по инициалам авторов), которые важны для интерпретации результатов численных экспериментов.

В модели TERRA производится вычисление интенсивности испарения с оголенной почвы (поверхности снега) и транспирации растений, потоков тепла и влаги вглубь почвы, представленной восьмью слоями, потоков тепла и влаги между слоем снега и поверхностью почвы. Также производятся расчеты высоты и водного эквивалента снежного покрова.

Влагосодержание слоев почвы, растительного покрова и снега вычисляется в гидрологическом блоке модели TERRA, при этом предполагается, что вода содержится в «резервуарах» на поверхности и в слоях почвы: «перехватывающем» резервуаре (часть задержанного растением дождя, роса на растениях и на почве), резервуаре снега (снег, замерзшая вода на почве и иней) и резервуарах в почвенных слоях. Предполагается, что резервуар «перехватывающий» растительностью влаги существует только при отсутствии снежного покрова. Изменение содержания воды в этих резервуарах осуществляется путем инфльтрации, просачивания и движения по капиллярам, а также за счет таяния снега и заморзания воды в «перехватывающем» резервуаре. Излишки влаги удаляются поверхностью и внутрипочвенным стоками. Источниками влаги из атмосферы являются осадки, роса и иней, стоками в атмосферу – испарение и транспирация.

Температура почвенных слоев и существующего снежного слоя вычисляется на основе решения уравнения теплопроводности. На нижней границе нижнего почвенного слоя задаются климатические значения температуры. На верхней границе связь между почвой (или снегом) и атмосферой осуществляется через радиационный баланс и потоки явного и скрытого тепла.

Модульная структура программного обеспечения TERRA позволяет довольно легко заменять алгоритмы параметризации, в частности, процессов в снежном покрове.

Рассмотрим наиболее существенные особенности двух различных схем параметризации снежного покрова, которые были включены в модель TERRA.

#### *Схема «EN» (старая схема)*

Снежный покров представлен одним слоем, вычисляются значения средней температуры этого слоя, а также температуры его поверхности (где должно выполняться условие равенства теплового баланса). Изменение температуры слоя снега происходит за счет потока тепла в почву, выделения – поглощения тепла при фазовых переходах снег – вода – лед, а также за счет учета температуры поверхности снега, поступающей из условия сбалансированности компонент теплового баланса (радиационного баланса и турбулентных потоков).

Учет процессов изменения альбедо снега во времени производится путем введения более высоких значений альбедо при выпадении снега.

При вычислении плотности производится коррекция в зависимости от температуры снега (учет изменения плотности снега за счет его старения) и от факта выпадения осадков (учет более низкой плотности свежего снега) с учетом температуры воздуха. Высота снега является функцией плотности и водного эквивалента. В свою очередь за счет осадков, испарения, просачивания и стока талой воды происходят изменения водного эквивалента.

Вода, полученная из растаявшего снега, оказывается на поверхности почвы. Далее происходит либо ее дальнейшее просачивание, либо удаление в качестве стока.

#### *Схема «EM» (новая схема)*

Схема «EM» явным образом описывает достаточно большой комплекс физических процессов. Снежный покров рассматривается как многослойная среда, каждый слой которой характеризуется своей температурой, влагосодержанием, толщиной, плотностью и пористостью.

Приращение температуры слоев на каждом шаге интегрирования осуществляются за счет теплообмена с соседними слоями, фазовых переходов и потока коротковолновой радиации (ослабление которого при проникновении вглубь снежного покрова происходит по закону Бутера), дополнительно для верхнего слоя — за счет турбулентных потоков и полного радиационного баланса.

Вода, получающаяся при таянии снега на его поверхности, не оказывается мгновенно на поверхности почвы, а просачивается в толщу снега, замерзая и отдавая при этом скрытое тепло кристаллизации снежному покрову. При этом скорости таяния снега и промерзания воды в каждом слое определяются тепловым балансом слоя. После расчета баланса жидкой и твердой влаги в слое снега на каждом шаге по времени вычисляется его новая толщина и плотность.

Расчет плотности снежных слоев производится с учетом значений плотности свежевыпавшего снега и последующих изменений плотности за счет изменений, происходящих внутри слоев с учетом содержания

в них жидкой и замерзшей воды. Плотность свежевыпавшего снега является функцией температуры поверхности снега.

Таким образом, основные отличия схемы «EM» от «EN» состоят в следующем:

- 1) в схеме «EM» снежный покров представлен несколькими слоями, количество и мощность которых зависит от суммарной высоты снега;
- 2) включено явное описание переноса солнечной радиации внутри снежного покрова (по закону Бутера—Ламберта);
- 3) включено явное описание уплотнения снега под действием метаморфизма и силы тяжести (путем расчета значений плотности снега в зависимости от температуры и содержания воды и льда в каждом слое);
- 4) учтен процесс просачивания талой воды в нижележащие слои с возможным последующим замерзанием и выделением тепла кристаллизации;
- 5) предложены более сложные алгоритмы расчета плотности и альбедо для вновь выпавшего и старого снега.

## **2. Анализ результатов численных экспериментов**

Целью выполнения численных экспериментов был анализ особенностей работы схемы «EM» в сравнении с «EN» для оценки целесообразности замены в модели TERRA схемы «EN» на «EM», а также выявление наиболее важных направлений дальнейшего усовершенствования параметризации снежного покрова в модели TERRA.

Численные эксперименты выполнялись путем интегрирования модели COSMO-RU14 [1] (шаг 14 км) для ETP (рис. 1–3). Прогнозы считались от срока 00 ч ВСВ, результаты рассматривались для заблаговременностей 24, 36, 48, 60 и 72 ч. Прогнозы на сроки 24, 48 и 72 ч соответствовали ночному времени суток, а на 36 и 60 ч — дневному.

Для исследований был выбран период с 11 по 29 марта 2009 года, когда на Европейской территории России началось разрушение снежного покрова. Период снеготаяния был выбран в связи с тем, что, во-первых, основные отличия алгоритмов схемы «EM» (см. раздел 1), как правило, касаются факторов, наиболее ярко проявляющихся при разрушении снежного покрова. Во-вторых, именно в этот

период теплообмен подстилающей поверхности с атмосферой в моделях атмосферы воспроизводится с большой долей неопределенности, что объясняется сложностью как самих процессов внутри тающего снежного покрова, так и усилением эффектов «подсечной» неоднородности за счет соседства территорий, покрытых и не покрытых снегом. Как результат – большие, доходящие до значений 10–15 °С, ошибки в прогнозировании значений приземной температуры.

Данные измерений были отобраны по группам метеостанций в различных частях ЕТР, что позволило проанализировать следующие типы ситуаций:

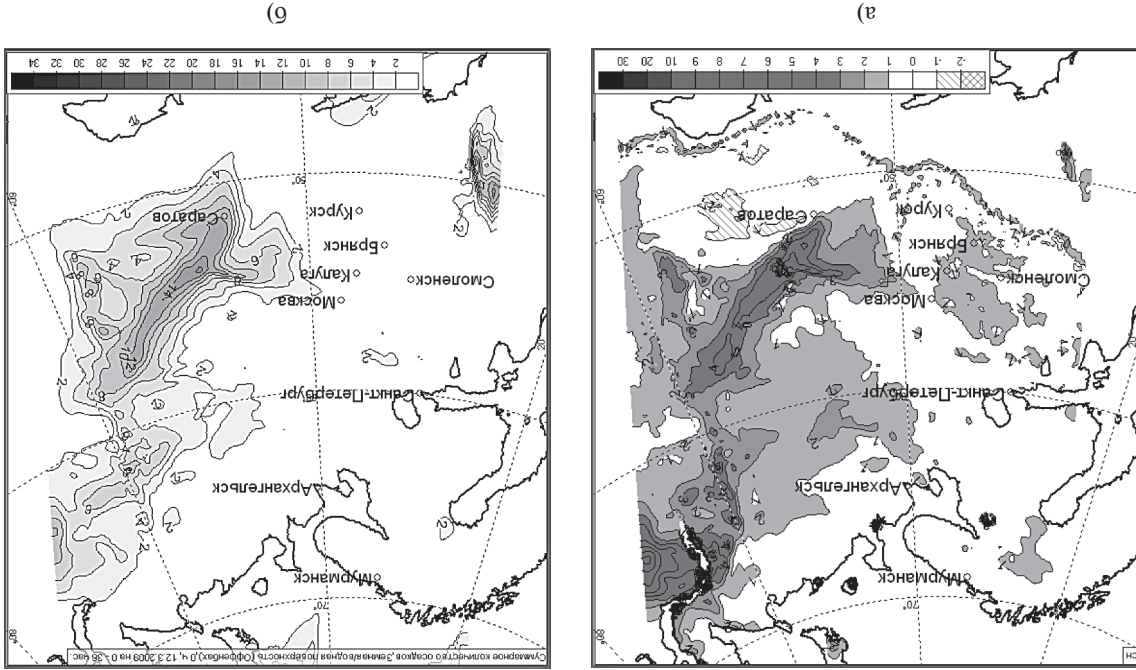
- а) южные районы: снежный покров подвергался таянию и полностью разрушению, осадки выпадали в виде дождя;
- б) центральные районы: мощный снежный покров находился в состоянии подтаивания днем, а за счет ночных отрицательных температур происходило замерзание оттаившей влаги;
- в) северные районы: снег практически не подвергался таянию.

Поскольку численные эксперименты были построены таким образом, что каждый раз обе схемы стартовали от одних и тех же начальных значений, наблюдалась большая зависимость моделируемых процессов от конкретных синоптических ситуаций. Именно такой подход был применен при интерпретации результатов численных экспериментов.

#### Результаты моделирования высоты снежного покрова

В выполненной серии численных экспериментов различия в высоте снега, моделируемой двумя схемами, оказывались значимыми на обширных территориях в случаях, если в период интегрирования в модели выпадали осадки в виде снега. В качестве примера на рис. 1 а приведена разность значений высоты снега (достигающая 10–12 см) при интегрировании на 36 ч. Из сопоставления с полем прогноза осадков (рис. 1 б) очевидно, что различия были обусловлены именно этим фактором. Специально выполненный анализ ситуаций с осадками показал, что при интегрировании до 72 ч было очень высокое соответствие реальным суммам осадков и использование различных схем параметризации снега не приводило к значимым отличиям в моделируемых суммах осадков, т.е. обратные связи не проявляли себя. Высота снега

Рис. 1. Анализ прогнозов на 36 ч. от 00 ч ВСВ 12 марта 2009 года: разность между высотой снега (см) по схемам «EM» и «EH» (а) и «EH» (а) и «EH» (б) и сумма осадков за 36 ч (мм) (б)



в районах его выпадения по схеме «ЕМ» была существенно больше, т.е. свежавпавший снег в этой схеме оказался более рыхлым. В более южных районах осадки выпадали в виде дождя, и в этом случае в схеме «ЕМ» высота снега уменьшилась несколько быстрее, чем в схеме «ЕН». Чтобы пояснить, в какой из схем – «ЕМ» или «ЕН» – алгоритм расчета плотности снега точнее, необходимо дополнительное тестирование по данным снегомерной съемки.

#### *Результаты моделирования водного эквивалента*

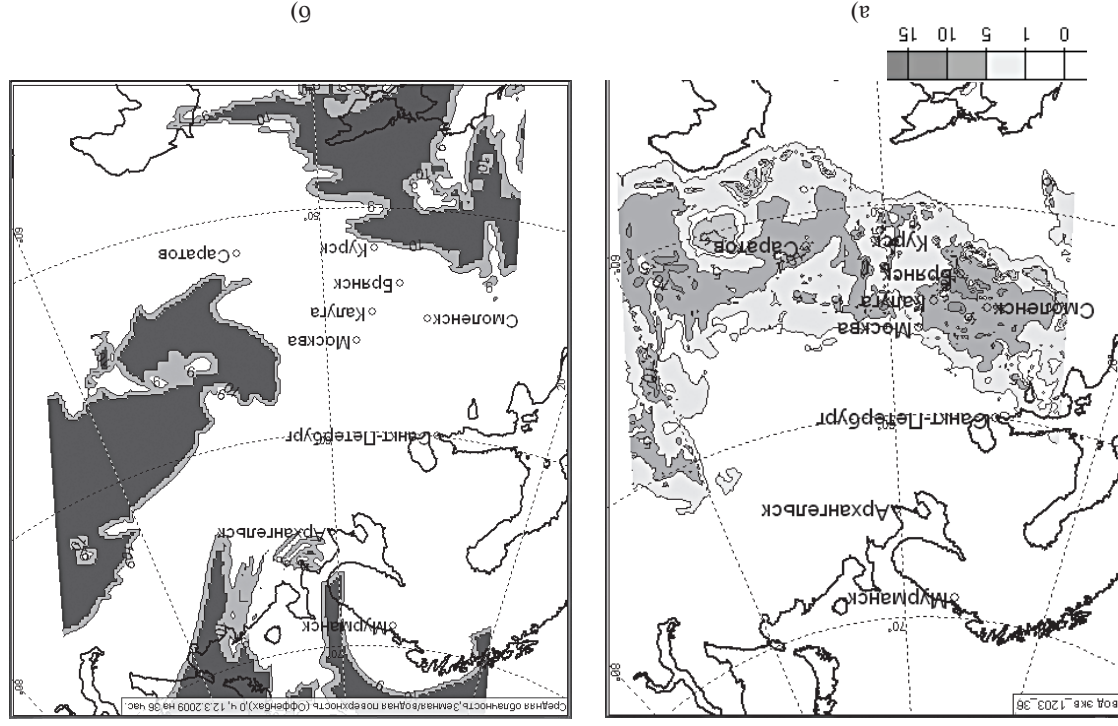
Отличия между значениями водного эквивалента по схемам «ЕМ» и «ЕН» (рис. 2) наблюдались в зоне таяния снега преимущественно в областях с малооблачной погодой, т.е. с высокой инсоляцией, обуславливающей таяние и нагрев слоев снега днем, и интенсивным выхолаживанием ночью, за счет которого происходило замерзание оттаившей влаги. Оказалось, что учет указанных факторов в схеме «ЕМ» приводит к тому, что в этой схеме уменьшение массы снежного покрова происходит медленнее, чем в «ЕН».

#### *Результаты моделирования приземной температуры воздуха*

Различия в значениях приземной (на уровне 2 м) температуры воздуха наблюдались как в дневные, так и в ночные часы в областях, где днем происходило таяние вследствие интенсивной инсоляции (см. рис. 3 в сопоставлении с рис. 2). При этом основные изменения температуры воздуха для дневного времени (36 ч) были сосредоточены вблизи границы снега и были связаны в основном с различным прогревом освободившихся и покрытым снегом ячеек (рис. 3). Районы значимых температурных отличий в ночное время (заблаговременно – ст. 24, 48, 72 ч) были гораздо обширнее и располагались внутри областей, покрытых снегом.

Более высокие значения приземной температуры по схеме «ЕМ» в ночные часы, по всей видимости, были связаны с тем, что новая схема учитывает процессы нагревания толщи снега днем вследствие проникновения в нее солнечной радиации, а также выделения теплоты ночью при замерзании образовавшейся при таянии днем воды. В результате температура приземного воздуха в районах, где происходило дневное таяние при высокой инсоляции, оказалась на 2–4 °С выше

Рис. 2. Анализ прогнозов на 36 ч от 00 ч ВСВ 12 марта 2009 года: разность между значениями водного эквивалента (мм) по схемам «ЕМ» и «ЕН» (а) и обличность среднего яруса (значения выше 7 баллов заштрихованы и черным фоном) (б)



в ночные часы, по сравнению с результатами схемы «ЕН». В дневные часы, напротив, области неустойчивого снежного покрова оказались более холодными ввиду более медленного освобождения от снега этих территорий.

В табл. 1 и 2 приведены значения средней ошибки ME, средне-квадратической ошибки RMSE и коэффициента корреляции CC для прогнозов значений температуры на 24–72 ч в период 11–29 марта 2009 года для численных экспериментов с включением либо схемы «ЕН» (табл. 1), либо – «EM» (табл. 2).

Как видно по значениям ME, в исследуемый период практически во всех численных экспериментах для обеих схем наблюдалось систематическое занижение приземной температуры. Возможно, это было частично связано с тем, что рассматривались метеостанции, расположенные внутри более «теплых» городов.

В таблицах случаи значимого преимущества показателей выделения жирным шрифтом. Можно увидеть, что при использовании схемы «EM» на станциях Москва, Брянск, Курск, Саратов значения средней ошибки, главным образом в ночные часы, уменьшились. Также видно, что коэффициенты корреляции между временными рядами фактических значений температуры и рядами прогнозов заданных заблаговременностей при использовании обеих схем для прогнозов на ночные часы (24, 48, 72 ч) были существенно выше, чем для прогнозов на дневные часы (36, 60 ч). При этом случаев с более высокими значениями CC у схемы «EM» больше, чем у «ЕН», преимущественно за счет ночных ситуаций в центральных и южных районах. Для этих станций, где наблюдалось таяние снега, эффект от замены схемы оказался более ощутимым для прогнозов на 72 ч. При этом использование новой схемы не привело к однозначному повышению успешности прогнозов приземной температуры в северных пунктах (Мурманск, Архангельск), где активное таяние еще не началось.

На рис. 4 и 5 показаны примеры графиков модельной приземной температуры и ее измеренных значений для ночного (рис. 4) и дневного (рис. 5) времени.

Для ночного времени (рис. 4) очевидна высокая коррелированность прогнозистических и фактических значений, при этом обе схемы занижают температуру, но новая схема оказывается «теплее» старой.

Рис. 3. Анализ прогнозов от 00 ч ВСВ 12 марта 2009 года: разности значения между значениями приземной температуры воздуха (°C) по схемам «EM» и «ЕН». Интегрирование на 24 ч – ночь (а) и 36 ч – день (б)

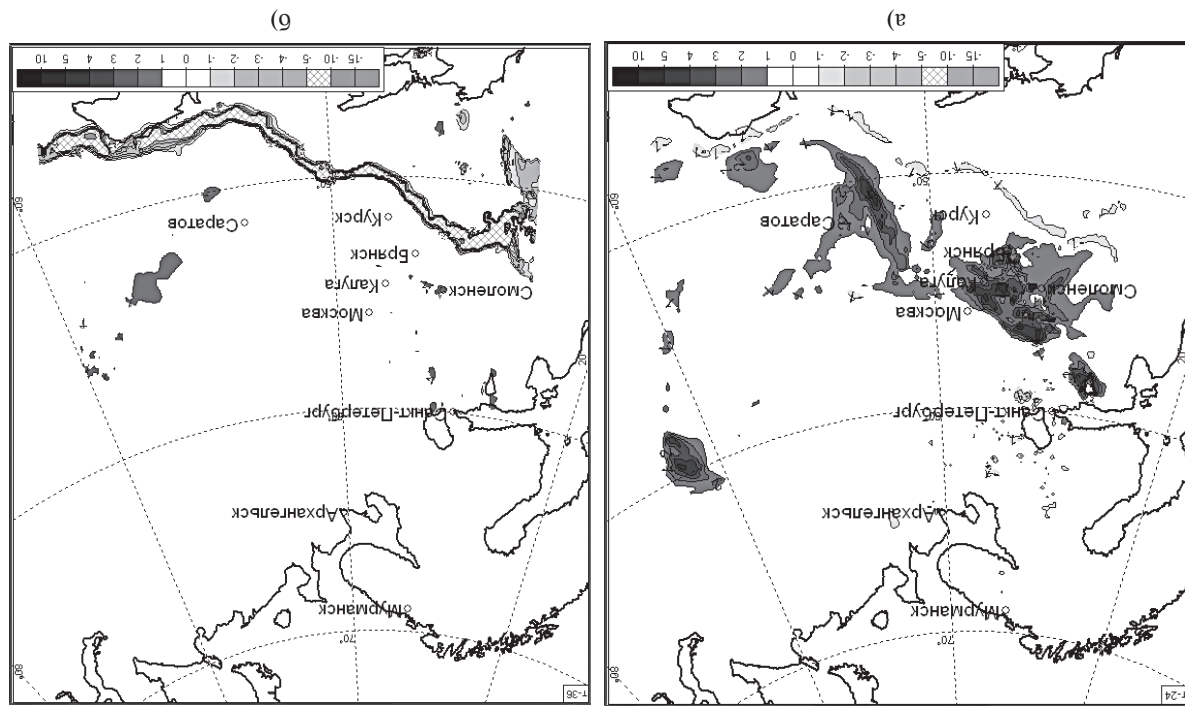


Таблица 1

Статистические оценки прогнозов приземной температуры на 24, 36, 48, 60 и 72 ч по модели атмосферы с использованием схемы «ЕН» за период 11–29 марта 2009 г.

Станция	ME					RMSE					CC				
	24	36	48	60	72	24	36	48	60	72	24	36	48	60	72
Мурманск	-0,9	-2,2	-0,5	-1,6	-0,5	4,0	2,7	3,6	2,4	2,2	0,71	0,85	0,75	0,74	0,92
С-Петербург	-2,0	-2,8	-0,9	-2,7	-1,5	2,5	3,5	2,3	3,3	3,4	0,86	0,69	0,17	0,42	0,67
Архангельск	1,1	0,5	0,9	0,1	1,3	3,0	3,0	2,9	3,2	3,5	0,87	0,64	0,75	0,67	0,42
Москва	-2,2	-3,4	-3,6	-3,4	-3,0	2,6	3,8	4,5	4,0	4,6	0,88	0,57	0,56	0,34	0,07
Калуга	-0,2	-2,1	-1,6	-2,2	-1,8	2,3	2,8	3,3	3,4	4,5	0,66	0,47	0,53	0,25	0,19
Смоленск	-0,6	-2,2	-0,3	-2,3	-0,8	2,4	3,0	2,6	3,1	3,5	0,79	0,41	0,71	0,40	0,48
Курск	-3,7	-3,2	-3,6	-3,8	-3,5	4,3	3,7	4,6	4,0	5,0	0,83	0,51	0,78	0,61	0,55
Брянск	-2,6	-2,3	-3,3	-2,7	-3,5	3,1	2,7	4,1	3,4	5,3	0,87	0,44	0,73	0,21	0,15
Саратов	-3,5	-2,3	-3,1	-2,8	-3,3	4,3	2,7	4,1	3,5	4,1	0,84	0,67	0,86	0,46	0,84

Таблица 2

Статистические оценки прогнозов приземной температуры на 24, 36, 48, 60 и 72 ч по модели атмосферы с использованием схемы «EM» за период 11–29 марта 2009 г.

Станция	ME					RMSE					CC				
	24	36	48	60	72	24	36	48	60	72	24	36	48	60	72
Мурманск	-1,1	-2,3	-0,7	-1,7	-0,5	3,9	2,7	3,6	2,4	2,2	0,75	0,86	0,75	0,78	0,92
С-Петербург	-1,8	-3,0	-1,1	-2,7	-1,2	2,5	3,6	2,9	3,3	3,0	0,84	0,18	0,59	0,14	0,53
Архангельск	0,8	0,4	0,7	0,1	1,1	3,0	3,3	3,0	3,2	3,5	0,85	0,60	0,71	0,65	0,66
Москва	-2,0	-3,4	-3,2	-2,7	-2,7	2,7	3,7	4,2	4,1	4,7	0,87	0,62	0,63	0,37	0,16
Калуга	0,2	-2,1	-1,2	-2,4	-1,4	2,3	2,8	3,7	3,4	4,6	0,70	0,51	0,55	0,26	0,22
Смоленск	-0,1	-2,2	0,1	-2,4	-0,3	2,0	2,9	3,2	2,8	3,2	0,84	0,45	0,66	0,34	0,59
Курск	-3,2	-3,3	-3,6	-3,5	-3,0	4,1	3,8	4,6	4,0	5,1	0,84	0,48	0,80	0,48	0,60
Брянск	-1,8	-2,4	-3,3	-2,8	-3,3	2,8	2,8	4,6	3,5	5,5	0,90	0,45	0,76	0,23	0,19
Саратов	-3,0	-2,5	-2,6	-2,9	-2,9	4,2	2,9	4,1	3,5	3,9	0,85	0,67	0,87	0,54	0,89

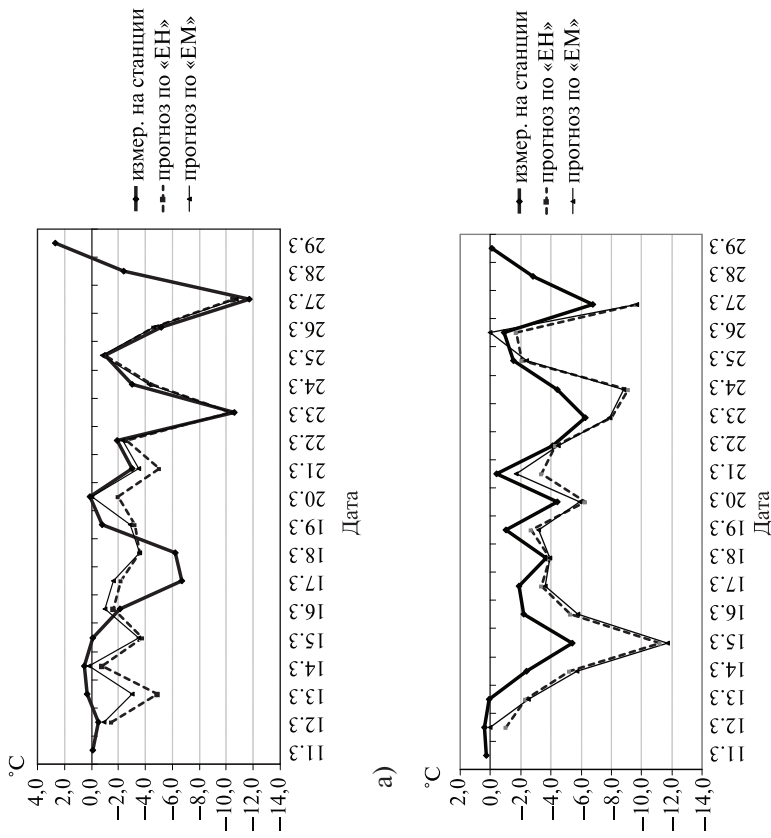
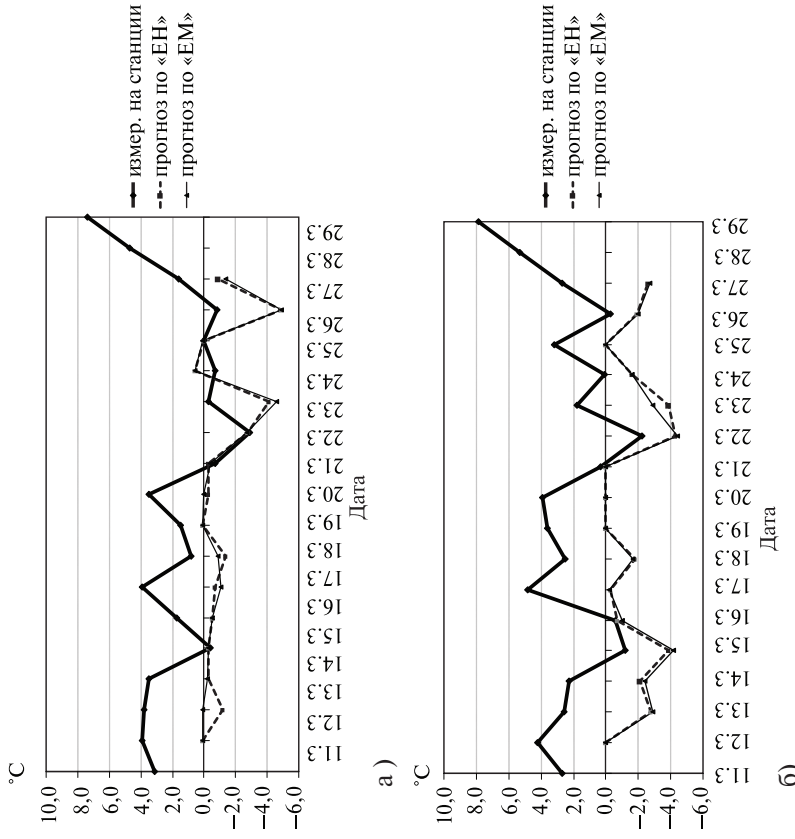


Рис. 4.

Временной ход прогнозных значений приземной температуры с использованием схемы «ЕН» и схемы «EM» (заблаговременность 24 ч, ночное время) и фактических значений, измеренных на станциях Смоленск (а) и Москва (б)

Отметим, что показанные примеры являются типичными, отмечаемые закономерности наблюдались на подавляющем большинстве станций, где наблюдалось таяние снега.

Наиболее очевидный недостаток работы модели TERRA, независимо от включенной в нее той или иной схемы снега, имел место для прогнозов на дневное время (рис. 5) и заключался в том, что принципиально не воспроизводились положительные значения приземной температуры воздуха при наличии в ячейке снежного покрова, хотя в реальности такие



**Рис. 5. Временной ход прогностических значений приземной температуры с использованием схемы «ЕН» и схемы «ЕМ» (заблаговременность 36 ч, дневное время) и фактических значений, измеренных на станциях Смоленск (а) и Москва (б)**

ситуации наблюдались почти ежедневно на метеостанциях в пределах достаточно обширной территории. Иными словами, «модельная» температура не могла подняться выше 0 °С, пока существовал снежный покров.

При этом максимальные значения абсолютной ошибки оказывались выше 10 °С. В этом случае различия между обеими версиями оказываются существенно меньшими, чем значения какие-то существенные факторы, влияющие на тепловое состояние приземного слоя атмосферы.

Очевидно, что в рассматриваемых ситуациях работающими «нагревателями» воздуха являются свободные от снега поверхности, чья температура повышается главным образом за счет больших значений положительного коротковолнового баланса. Такими элементами могут быть дороги, кварталы застройек, проталины, освободившиеся от снега склоны овражно-балочной сети, ветви деревьев и др.

Одним из первых шагов преодоления данного недостатка может быть «настройка» имеющегося алгоритма описания эффектов частичного покрытия снегом ячейки.

Частичное покрытие снегом в TERRA задается с помощью параметра фракционного покрытия  $cf\_snow$ . Эта величина имеет физический смысл критического значения водного эквивалента, начиная с которого возможно появление проталин. В схеме этот параметр задается равным 0,0015 м. Часть ячейки, покрытая снегом, определяется по формуле:

$$zrss = \max(0,01, \min(1,0, \frac{zwsnow}{cf\_snow})),$$

где  $zrss$  — часть ячейки, покрытая снегом;  $zwsnow$  — водный эквивалент снега.

Численные эксперименты проводились для значений  $cf\_snow$ , равных 0,005, 0,01, 0,02 и 0,05 м. Оказалось, что модель реагирует на изменения параметра, но ощутимая реакция наблюдалась только в случае задания  $cf\_snow = 0,05$  м, т.е. 5 см осаждаемой воды. (рис. 6). При этом различия для значений высоты снежного покрова достигали 7 см, а для температуры — 8 °С в дневные часы, но были сконцентрированы в очень узкой полосе вдоль границы снежного покрова. Поэтому при введении большого значения для параметра  $cf\_snow$ , равного 0,05 м, в подавляющем большинстве пунктов, находящихся вне выявленных областей влияния, естественно, изменений прогнозов приземной температуры не происходило.

## Выводы

На основании сопоставления результатов моделирования с использованием усовершенствованной схемы параметризации



в региональном и глобальном масштабах на основе аэрокосмического и наземного мониторинга для уменьшения негативных последствий антропогенных воздействий».

#### Список литературы

1. *Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А.* Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // *Метеорология и гидрология.* – 2010. – № 8. – С. 5–20.
2. *Володина Е.Е., Бенгтссон Л., Лыков В.Н.* Параметризация процессов теплообмена в снежном покрове для моделирования сезонных вариаций гидрологического цикла суши // *Метеорология и гидрология.* – 2000. – № 5.
3. *Мачульская Е.Е.* Моделирование и прогноз процессов теплообмена между атмосферой и суши в условиях холодного климата: диссертация. – 2001.
4. *Doms G., Shättler U.* A Description of the Nonhydrostatic Regional Model LM. Part 1: Dynamics and Numerics. – 2002. – [www.cosmo-model.org](http://www.cosmo-model.org).
5. *Doms G., Shättler U., Schraff C.* A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model, User's Guide. – 2008. – [www.cosmo-model.org](http://www.cosmo-model.org).
6. *Doms G., Heise E. et al.* A Description of the Nonhydrostatic Regional Model LM. Part 2: Physical Parameterization. – 2007. – [www.cosmo-model.org](http://www.cosmo-model.org).
7. *Machulskaya E.E., Lykov V.N.* An advanced snow parameterization for models of atmospheric circulation // *COSMO Newsletter.* – 2008. – N 8. – P. 10–16.