

АНАЛИЗ ПРИМЕРОВ УСВОЕНИЯ ДАННЫХ В РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ WRF-ARW

М.М. Смирнова, К.Г. Рубинштейн

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

marja1702@gmail.com

Введение

В качестве начальных данных для прогноза с помощью региональных моделей динамики атмосферы обычно используются данные различных анализов и реанализов, например, данные Национального центра США по прогнозированию окружающей среды (NCEP), Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF), Японского метеорологического агентства (JMA), Гидрометцентра России и другие. Эти данные часто имеют достаточно грубое пространственное разрешение (в лучшем случае $0,5^\circ$). При этом известно и еще раз продемонстрировано в данной работе, что в ряде случаев имеет место значительное расхождение между данными анализа и наблюдениями. Отличия могут быть обусловлены различными факторами, например такими, как отсутствие данных по некоторым станциям в международном обмене, опоздание данных измерений к сроку отсечения, особенности интерполяции в регулярную сетку, грубое пространственное разрешение анализа и т.д. Ошибки в начальных данных, естественно, служат источником ошибок прогнозов. Исправить начальные данные можно, повторно усвоив данных наблюдений в прогностической сетке.

Одним из способов усвоения данных является трехмерный вариационный анализ. Данная процедура позволяет получить новые поля метеорологических элементов в начальный момент времени в модельной сетке, которые в большей мере соответствуют данным наблюдений. Такой подход в большинстве случаев используется для учета дополнительных данных измерений, не включенных при расчете предварительного анализа. В ряде работ, например в [2, 6, 11], была показана эффективность данного подхода. Однако на территории России важно также учесть измерения и стандартных синоптических станций, в первую очередь не участвующих в международном обмене.

В рамках данной работы на примере системы WRFDA 3DVAR [3] в модели WRF-ARW [9] было исследовано влияние усвоения данных для различных областей на территории России и один пример для территории Японии. Проанализированы изменения после

усвоения данных начальных полей метеоэлементов и степень влияния этих изменений на качество прогнозов.

Усвоение данных с помощью WRFDA-3DVAR

Система WRFDA (Weather Research Forecast Data Assimilation) является реализацией алгоритма трехмерного вариационного анализа [3]. Метод усвоения данных наблюдений основан на минимизации функционала (1):

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b) + \frac{1}{2}(\mathbf{y} - H(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - H(\mathbf{x})) \quad (1)$$

где \mathbf{x} – вектор состояния атмосферы; \mathbf{x}^b – исходное состояние; \mathbf{y} – наблюдения; H – оператор наблюдений; \mathbf{B} – матрица ковариаций ошибок модели (background error covariance).

В модели WRF матрица ошибок рассчитывается методом, получившим название NMC (National Meteorological Center) [11]. Она может быть взята универсальной, рассчитанной в NCEP на основе прогнозов модели GFS (Global Forecasting System – Глобальная система прогноза), или может быть вычислена на основе предыдущих прогнозов самой модели WRF для конкретной области и сезона года. Основное отличие двух способов задания матрицы ошибок заключается в методике расчета вертикальных ковариаций и использовании во втором случае прогнозов этой же модели. В данной работе использовался первый вариант задания матрицы ошибок, так как при предварительном анализе использование второго метода не показало особых преимуществ. При использовании системы также важно подобрать ряд управляющих параметров, учитывающих вес различных ошибок наблюдений.

Для усвоения могут быть использованы данные измерений на синоптических станциях, кораблях, аэрологического зондирования, самолетных измерений, шаров-пилотов, профилемера ветра, ряд спутниковых данных о температуре поверхности, влагосодержании в столбе воздуха, скорости ветра (всего 16 различных типов данных).

Области прогноза

Для анализа использовались несколько областей прогноза. Карты областей прогноза с указанием расположения метеорологических станций приведены на рис. 1. Первая область охватывает Московский регион, имеет пространственное разрешение 2 км; вторая охватывает всю Европейскую территорию России и имеет разрешение 20 км; третья область покрывает Мурманскую область и имеет разрешение 5 км. Выбор высокого разрешения для некоторых областей позволяет надеяться на детальное описание метеорологических полей и

их возможных локальных особенностей. Области выбирались таким образом, чтобы можно было оценить влияние усвоения данных в различных регионах, а также на разных пространственных масштабах и размерах самой области. Отдельно были проведены эксперименты для области, охватывающей территорию Японии (с разрешением 10 км), в которых были рассмотрены возможности усвоения данных в сложной, близкой к штилевой метеоситуации.

Для всех областей использовалась одинаковая конфигурация модели, включающая следующие параметризации: микрофизика – WSM 6-class [8], длинноволновая и коротковолновая радиация – RRTMG [5], пограничный и приземный слои – QNSE [10], почва – Noah [4]; параметризация конвекции [7] использовалась только для области Европейской территории России (из-за ее пространственного разрешения 20 км).

Исходные данные и проведенные эксперименты

В качестве исходных полей использовались данные анализа NCEP (прогноза нулевой заблаговременности), имеющего пространственное разрешение $0,5^\circ$. Эти данные интерполируются в расчетную сетку. Возможно, что при усвоении данных наблюдений в мелкой расчетной сетке могут проявиться какие-то локальные эффекты, отсутствующие в данных анализа из-за его грубого пространственного разрешения.

В качестве данных наблюдений использовались данные синоптических и аэрологических измерений на станциях, их месторасположение приведено на рис. 1. На карте Европейской территории России показаны все доступные нам синоптические станции (открытые точки) и станции, используемые NCEP при расчете глобального анализа (закрашенные точки). Этот пример показывает, что данные с ряда станций не используются и, соответственно, доступно достаточно большое количество дополнительной информации, которая может быть усвоена.

Были выбраны зимний (январь 2010 года) и летний (июль 2009 года) месяцы, для которых были проведены две серии экспериментов для трех областей (кроме Японии). Для каждого суток рассчитывался прогноз на 48 ч. В первой серии экспериментов в качестве начальных данных использовались данные NCEP (в дальнейшем обозначены как base). Во второй серии экспериментов был рассчитан новый анализ с усвоением всех доступных данных наблюдений (обозначены как 3DVAR).

Помимо этого были проведены отдельные эксперименты для случаев, в которых существовали особо значительные расхождения данных измерений на синоптических станциях и анализов NCEP. Они будут подробно описаны ниже.

Изменения начальных полей

В первую очередь было проанализировано, каким образом добавление данных измерений влияет на начальные поля.

Данные анализа были интерполированы в мелкую расчетную сетку (эксперимент base). Затем в этой сетке были усвоены данные наблюдений на синоптических станциях и аэрологического зондирования (эксперимент 3DVAR). Были рассчитаны разности между полученными таким образом полями и измерениями на синоптических станциях, а также абсолютная ошибка и среднеквадратическое отклонение. Для сравнения выбирался ближайший к станции узел модельной сетки.

На рис. 2 приведены временные ходы средней ошибки начальных полей температуры для зимнего и летнего месяцев для различных областей по данным этих двух экспериментов. Поскольку усваивались те же данные, что и для оценок, то полученные ошибки результирующих начальных полей близки к нулю. Однако по этим графикам можно косвенно судить о качестве анализа NCEP для рассматриваемых областей. В большинстве случаев его ошибка составляет для температуры около 1 °С, однако, можно выделить ряд случаев в рассматриваемые периоды времени, когда она оказывалась около 4–5 °С. В январе ошибки больше, чем в июле, особенно для Мурманской области, для которой средняя разность температуры составила 2,4 °С.

Аналогично были рассчитаны ошибки ветра, давления и влажности (отношения смеси), т.е. тех параметров, данные о которых могут усвоены в WRFDA. При этом было выявлено, что ошибки влажности составляют около 0,5 г/кг. Выделяется случай (16 июля 2009 года), когда ошибка составила 4,8 г/кг в целом по Европейской территории России и около 3 г/кг – для Московской области.

Для всех областей ошибки скорости ветра в среднем не превышали 2 м/с. Поле давления также достаточно близко по данным анализа и наблюдений.

Аналогично были рассчитаны ошибки вертикальных профилей температуры, скорости ветра и влагосодержания, по сравнению с данными аэрологического зондирования. Их анализ показал небольшую величину отклонений. Расхождения данных измерений и исходных анализов видны в основном в приземных данных.

Анализ случая сильного мороза для Мурманской области

Особый интерес для выявления возможностей механизма усвоения данных являются случаи больших ошибок прогнозов. Одним из таких случаев была ситуация сильного мороза в Мурманской области 5–7 января 2010 года, когда ни при каком выборе параметризаций и параметров не удавалось воспроизвести наблюдавшееся понижение температуры. Разности в температуре между наблюдениями на станциях и данными анализа, интерполированными в модельную сетку, показаны на рис. 3.

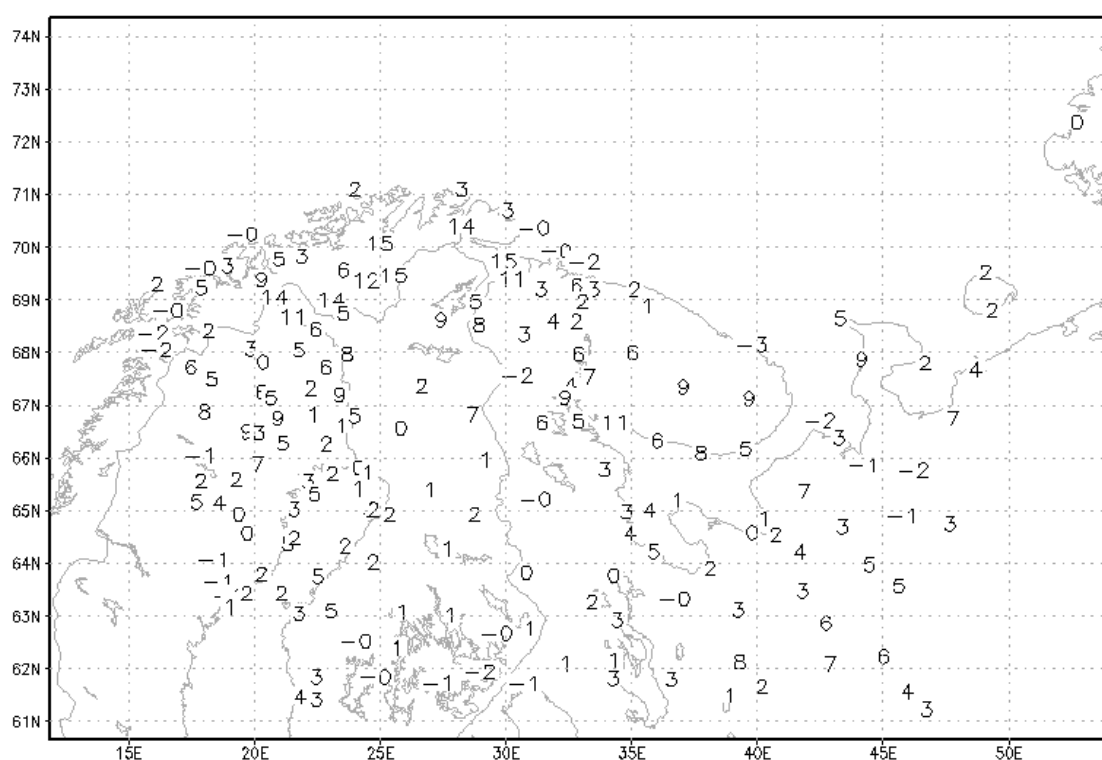


Рис. 3. Разность между начальным полем температуры и наблюдениями на станциях (°C).

Видно, что по данным анализа температура хорошо воспроизводится в Скандинавии, сильно занижается в Мурманской области. Наибольшая разность значений температуры между анализом и данными синоптических станций составила 15 °C. Анализ профилей, полученных аэрологическим зондированием и по данным NCEP, показал их близость. Выше 1 км (10-15 модельного уровня) начальные поля практически совпадают. С помощью 3DVAR начальные поля были изменены так, что при усвоении синоптических данных температура понизилась на 3–5 °C практически по всей территории всей Мурманской области. При этом

понижилась температура в нижних 500 м (на 5–10 нижних модельных уровнях). Таким образом, в начальных данных нижний слой атмосферы оказался охлажденным относительно данных исходного анализа.

На рис. 4 показан временной ход прогнозируемой температуры, осредненной по области 67–69° с.ш. 35–40° в.д., от исходных начальных полей и полей после 3DVAR. Исходное отличие между прогнозами в 4,1 °С в течение 12 часов прогноза убывает до 1 °С. Однако разность сохранялась в течение всех 60 часов прогноза и составила к концу срока 1,7 °С. Данные наблюдений на станциях показывали еще на 2-6°С более низкую температуру, но, тем не менее, использование усвоения данных позволило уменьшить ошибку прогноза почти на 2 °С.

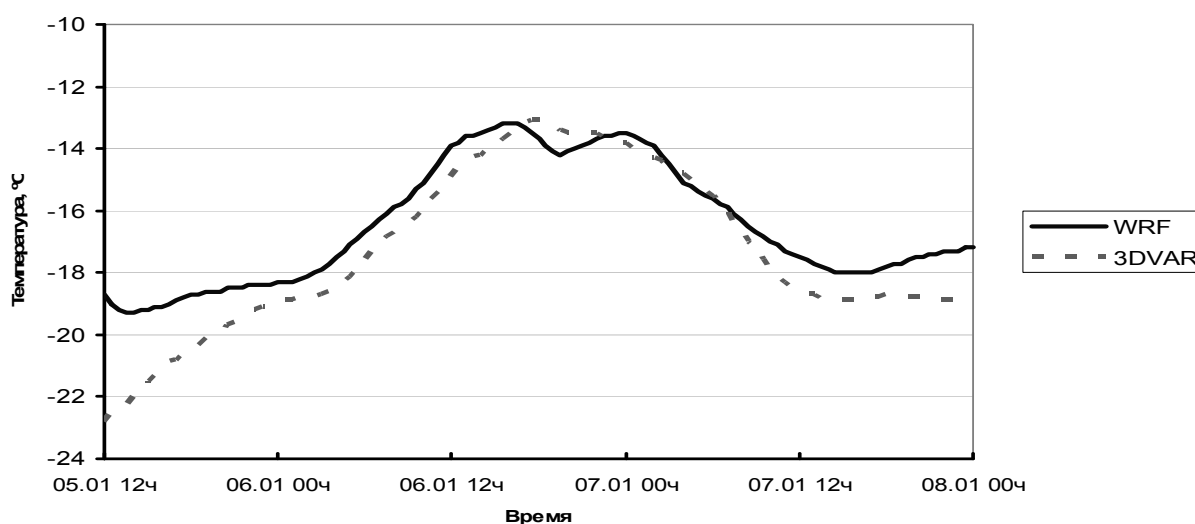


Рис. 4. Осредненная по области 67-69° с.ш. 35-40° в.д. температура в двух прогнозах, от анализа NCEP (WRF) и прогноза с усвоением данных (3DVAR)

Воспроизведение в прогнозе поля приземного ветра в районе Японии

Одной из задач, для которых необходимо очень точное воспроизведение полей скорости ветра, является использование данных расчетов метеорологических полей в качестве входных данных для моделей распространения и переноса примесей. При прогнозировании метеоситуации вокруг атомной станции Фукусима после аварии были выявлены значительные расхождения в направлениях ветра. Следует заметить, что по данным наблюдений ситуация 15 марта 2010 года характеризовалась сложной метеобстановкой. С 0 часов 15 марта (по местному времени) ветер дул на юг и юго-запад в сторону суши, а во второй половине дня 15 марта (после 12 часов) ветер поменял

направление на северо-запад. При этом наблюдалась значительная изменчивость ветра по территории. В эти сроки были зафиксированы выбросы радионуклидов во время аварии на АЭС.

Ни в анализе NCEP, ни в анализе Европейской центра среднесрочных прогнозов, ни в прогнозе от исходного анализа NCEP не воспроизводились наблюдавшиеся изменения в направлении ветра. Ветер южного и юго-западного направлений не присутствовал в таком прогнозе. Использование 3DVAR позволило в значительной степени скорректировать поле ветра и получить направления ветра, более соответствующие наблюдавшимся величинам и направлениям (рис. 5). Использование полученного таким образом поля ветра в качестве исходных данных для модели распространения радионуклидов позволило получить след выброса, хорошо соответствующий данным измерений [1, 13].

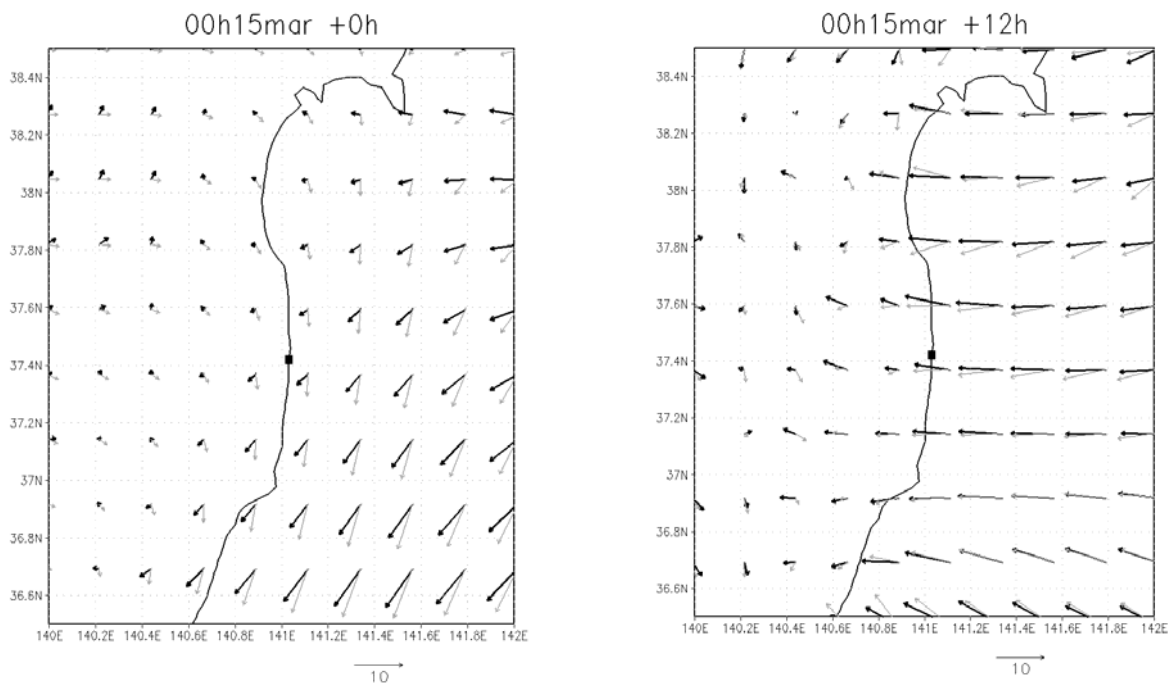


Рис. 5. Поле приземного ветра в районе Фукусимы в исходном прогнозе (серые стрелки) и после усвоения данных (черные стрелки).

Статистический анализ результатов

Были рассчитаны две серии прогнозов на 48 часов каждый через сутки: первая серия прогнозов – от исходных начальных полей на основе анализа, вторая – от полей анализов, измененных с помощью системы 3DVAR. Расчеты осуществлялись для трех областей (кроме Японии) для января 2010 г. и июля 2009 года.

По результатам были рассчитаны средние разности между стационарными данными и прогнозами, а также абсолютная и среднеквадратическая ошибки для скорости ветра, температуры, абсолютной влажности и давления.

Оказалось, что для Московской области разность между прогнозами от исходных начальных полей и полей после 3DVAR довольно быстро исчезает со временем, т.е. прогноз перестает определяться начальными данными.

Было выдвинуто предположение, что начальные значения метеорологических параметров довольно быстро «уносятся ветром», и прогноз в таком случае определяется только граничными условиями и практически не зависит от начальных условий. В связи с этим были произведены расчеты на большей области и посчитана аналогичная разница между прогнозами. Оказалось, что на этой области разность так же быстро затухает со временем.

Гипотеза о «сдувании» была проанализирована путем наложения на карты разности температуры между прогнозами поля скорости ветра (рис. 6). Отличия между прогнозами иногда можно связать со скоростью ветра, переносом температурных «неоднородностей» ветром. В рассмотренном примере созданные «возмущения» температурного поля переносились характерным для Московской области западным ветром и где-то через 10–12 часов прогноза уже «вышли» за границы рассматриваемой области.

Графики средней ошибки прогноза температуры в зависимости от заблаговременности прогноза приведены на рис. 7.

В большинстве случаев прогнозы от анализов и от 3DVAR практически совпадают, отличия наиболее заметны лишь при небольших заблаговременностях прогноза. Летом в Мурманской и Московской областях прогнозы отличаются только первые 6 часов прогноза, при больших заблаговременностях усвоение данных не оказывает влияния на прогноз. Эффект 3DVAR заметен в зимний месяц, особенно в Мурманской области, эффект усвоения данных прослеживается до 36–48 часов.

Средняя разность (BIAS), абсолютная ошибка (ABIAS) и среднеквадратичная ошибка (RMSE) прогнозов температуры (T , °C), отношения смеси (Q , г/кг) и давления (p , гПа) при использовании исходных начальных полей и после усвоения данных для заблаговременности 24 ч приведены в табл. 1 (в табл. 1 и 2 выделены случаи уменьшения ошибок). Средние ошибки по всем параметрам практически совпадают, можно заметить лишь небольшое уменьшение в январе в Мурманской области.

Зимой ошибки влажности невелики, изменения, вносимые усвоением данных, незначительны. Летом прослеживается небольшое уменьшение ошибок для Мурманской области и Европейской территории России.

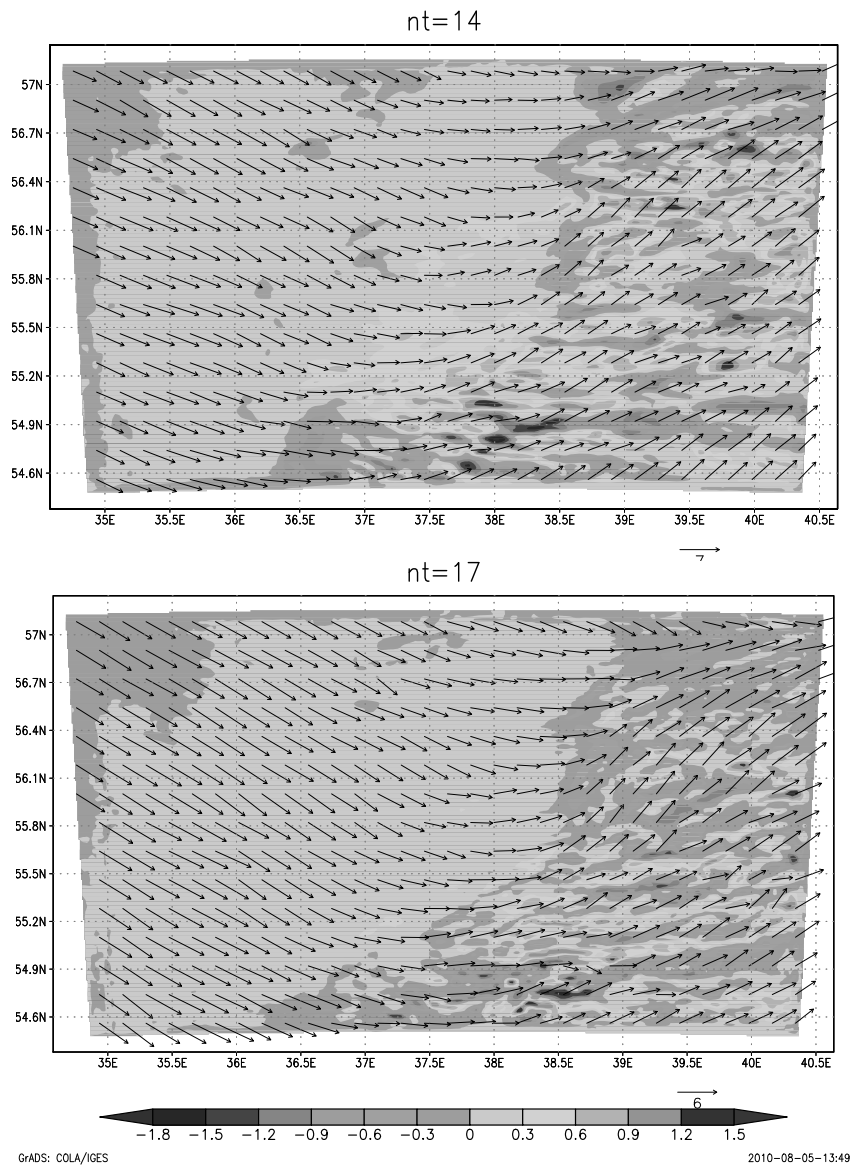


Рис. 6. Разность между прогнозами температуры и ветер через 7 ч от начала прогноза (сверху) и через 8,5 ч (снизу).

Векторные ошибки скорости ветра в зависимости от заблаговременности приведены в табл. 2. Исходное начальное уменьшение ошибки ветра не прослеживается при больших заблаговременностях. Только небольшое уменьшение ошибок произошло для Европейской территории России для летнего месяца.

Отдельно было оценено влияние усвоения данных на прогноз такой интегральной величины, как осадки. Результаты расчетов оценок осадков на 12 ч заблаговременностью 30 ч приведены в табл. 3. Оказалось, что ошибки при использовании исходных начальных полей и после усвоения данных практически совпадают.

Таблица 1

Ошибки прогнозов на 24 ч температуры, отношения смеси и давления при использовании исходных начальных полей (base) и после усвоения данных (var)

	Январь 2010						Июль 2009					
	BIAS		ABIAS		RMSE		BIAS		ABIAS		RMSE	
	base	var	base	var	base	var	base	var	base	var	base	var
Европейская территория России												
T	-1,36	-1,17	3,37	3,24	4,76	4,34	-0,05	0,23	1,69	1,71	3,42	3,43
Q	-0,15	-0,11	0,36	0,35	0,50	0,50	-0,34	-0,04	1,13	1,09	1,61	1,54
p	1,86	1,04	2,59	1,98	33,41	22,70	0,62	0,13	1,54	1,56	14,72	14,32
Московская область												
T	-1,02	-1,03	2,76	2,77	3,23	3,24	0,79	0,81	1,55	1,56	1,90	1,90
Q	-0,08	-0,09	0,22	0,22	0,26	0,26	0,16	0,17	0,74	0,73	0,91	0,90
p	0,81	0,79	0,89	0,88	1,11	1,11	0,18	0,18	0,55	0,55	0,68	0,68
Мурманская область												
T	-1,87	-1,50	3,81	3,66	4,87	4,67	0,65	0,63	1,49	1,47	1,89	1,87
Q	-0,11	-0,05	0,36	0,34	0,44	0,42	0,03	0,06	0,62	0,62	0,81	0,81
p	0,69	0,60	0,98	0,92	1,25	1,19	0,21	0,20	0,54	0,52	0,74	0,71

Таблица 2

Векторная ошибка ветра при использовании исходных начальных полей (base) и после усвоения данных (var)

Заблаговременность, ч	Январь 2010		Июль 2009	
	base	var	base	var
Европейская территория России				
0	1,71	1,19	1,50	1,06
12	1,56	1,55	1,77	1,65
24	1,61	1,60	1,52	1,46
48	1,64	1,64	1,60	1,54
Мурманская область				
0	1,94	1,52	1,45	1,19
12	1,58	1,56	1,57	1,55
24	1,64	1,62	1,26	1,27
48	1,68	1,67	1,29	1,29
Московская область				
0	1,32	0,80	1,32	0,89
12	1,44	1,40	1,70	1,75
24	1,44	1,43	1,20	1,21
48	1,45	1,45	1,19	1,19

Оценки прогноза осадков на 30 ч (мм/12 ч) при использовании исходных начальных полей (base) и после усвоения данных (var)

Оценка прогноза	Мурманская область				Европейская территория России			
	январь 2010 г.		июль 2009 г.		январь 2010 г.		июль 2009 г.	
	base	var	base	var	base	var	base	var
Асолютная ошибка	1,60	1,59	2,51	2,49	5,22	5,20	5,83	5,78
Средняя ошибка	-0,79	-0,80	-1,08	-1,11	-4,48	-4,49	-4,74	-4,82
Общая оправдываемость	61	61	67	67	65	65	69	70
Оправдываемость факта осадков	54	52	56	54	51	50	42	41
Оправдываемость факта без осадков	69	70	76	78	77	78	80	82
Предупрежденность факта осадков	67	67	67	68	65	65	47	48
Предупрежденность факта без осадков	57	56	67	67	65	65	77	77

Заключение

Таким образом, можно сказать, что разность в прогнозах от исходных анализов и после дополнительного усвоения данных заметна лишь при больших расхождениях начальных данных и измерений на станциях, которые возникают несколько раз в месяц, или при очень малых заблаговременностях прогноза. При таких условиях использование системы 3DVAR улучшает прогноз и не ухудшает в остальных. Соответственно, наличие подобных случаев оправдывает использование данной системы, которая не требует больших затрат машинного времени.

Проведенный анализ показывает, что подобное изменение начальных данных оказывает влияние на прогноз при заблаговременностях до 10–12 ч для небольших областей, на 24–48 ч – для больших областей. Тем не менее, следует подчеркнуть, что в некоторых случаях, подобных приведенному примеру по Японии, использование 3DVAR просто необходимо.

Работа выполнена с частичной поддержкой гранта РФФИ 10-08-00493-а и FP7-IRSES-"Climseas".

Список использованных источников

1. Арутюнян Р.В., Бакин Р.И., Большов Л.А., Дзама Д.В., Припачкин Д.А., Семенов В.Н., Сороковикова О.С., Фокин А.В., Цаун С.Н., Шикин А.В., Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Смирнова М.М. Некоторые результаты по моделированию радиационной обстановки и оценке источника

аварийного выброса на АЭС Фукусима-1 с учетом трехмерных полей метеоданных. – Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2011-07.

2. *Abhilash S., Someshwar D., Kalsi S.R., Gupta M.D, Mohankumar K., John P.Ge, Banerjee S.K., Thampi S.B., Pradhan D.* Impact of Doppler Radar Wind in Simulating the Intensity and Propagation of Rainbands Associated with Mesoscale Convective Complexes Using MM5-3DVAR System // *Pure and Applied Geophysics.* – 2007. – Vol. 164. – N. 8–9. – P. 1491–1509.

3. *Barker D.M., Huang W., Guo Y.R, Xiao Q.N.* A Three-Dimensional (3DVAR) Data Assimilation System For Use With MM5: Implementation and Initial Results // *Mon. Wea. Rev.* – 2004. – Vol. 132. – P. 897–914.

4. *Chen F., Dudhia J.* Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation // *Mon. Wea. Rev.* – 2001. – Vol. 129. – P. 569–585.

5. *Iacono M.J., Delamere JS., Mlawer E. J., Shephard M.W., Clough S.A., William D. Collins* Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models // *Journal of Geophysical Research.* – 2008. – Vol. 113. – D13103.

6. *Govindankutty M., Chandrasekar A.* Effect of 3DVAR assimilation of MODIS temperature and humidity profiles on the dynamic and thermodynamic features of three monsoon depressions over the Bay of Bengal // *Meteorology and Atmospheric Physics.* – 2010. – Vol. 107. – N. 1–2. – P. 65–79.

7. *Grell G.A., Devenyi D.* A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques // *Geophys. Res. Lett.* – 2002. – Vol. 29(14). – Article 1693.

8. *Hong, S.-Y., Lim J.-O J.* The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6) // *J. Korean Meteor. Soc.* – 2006. – Vol. 42. – P. 129–151.

9. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. et al.* A Description of the Advanced Research WRF Version 3 // NCAR/TN-475+STR. – National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, 2008.

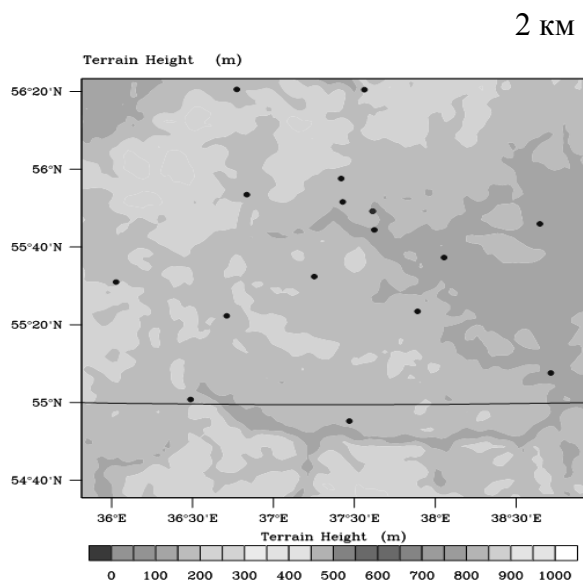
10. *Sukoriansky S., Galperinand B., Staroselsky I.* A quasi-normal scale elimination model of turbulent flows with stable stratification // *Physics of Fluids.* – 2005. – Vol. 17. – 085107–1–28.

11. *Parrish D.F., Derbe J.C.* The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system // *Mon. Wea. Rev.* – 1992. – Vol. 120. – P. 1747–1763.

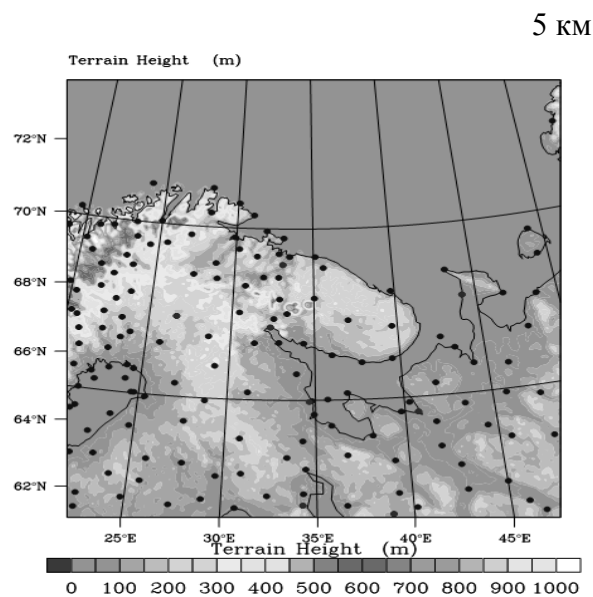
12. *Routray A., Mohanty U.C., Niyogi D., Rizvi S.R.H., Krishna K. Osuri.* Simulation of heavy rainfall events over Indian monsoon region using WRF-3DVAR data assimilation system // *Meteorology and Atmospheric Physics.* – 2010. – Vol. 106, N. 1–2. – P. 107–125.

13. *Rubinstein K.G., Nabokova E.M., R.Y. Ignatov R.Y, Smirnova M.M., Arutunyan R.V., Semyonov V.N., Sorokovikova O.S., Fokin A.V., Pripachkin D.A.* Calculation of Surface Tracer Concentration by Set of Hydrodynamic. Weather Forecast Model and Lagrangian Model of Atmospheric Dispersion // *Journal of Environmental Science and Engineering.* – 2012. – Vol. A1. – P. 43–61.

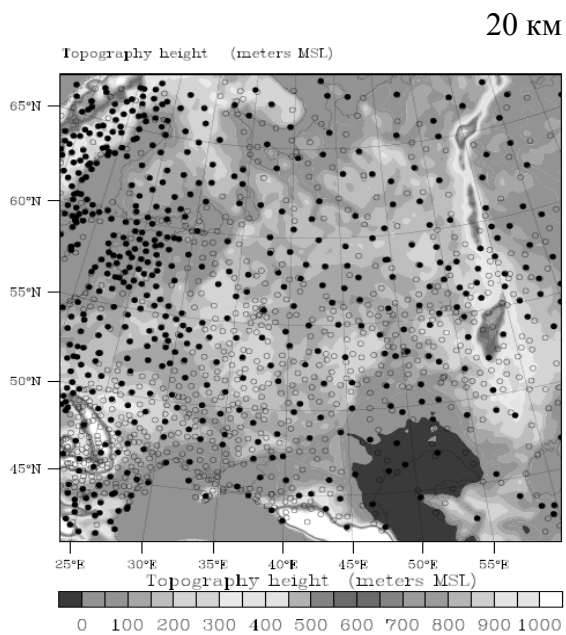
Поступила в редакцию 15.04.2012 г.



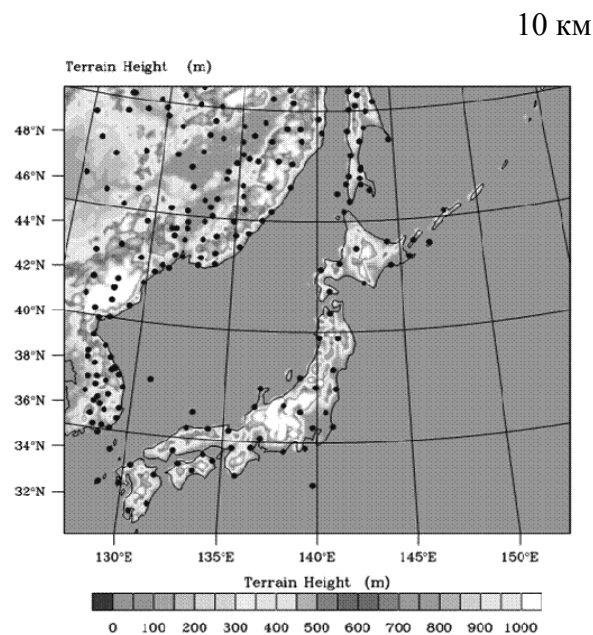
а)



б)



в)



г)

**Рис. 1. Области прогноза: Московская область(а), Мурманская область (б),
Европейская территория России (в), Япония (г).**

В правом верхнем углу указано пространственное разрешение в прогнозе.

Тонем указана топографическая высота, точками – расположение синоптических станций.

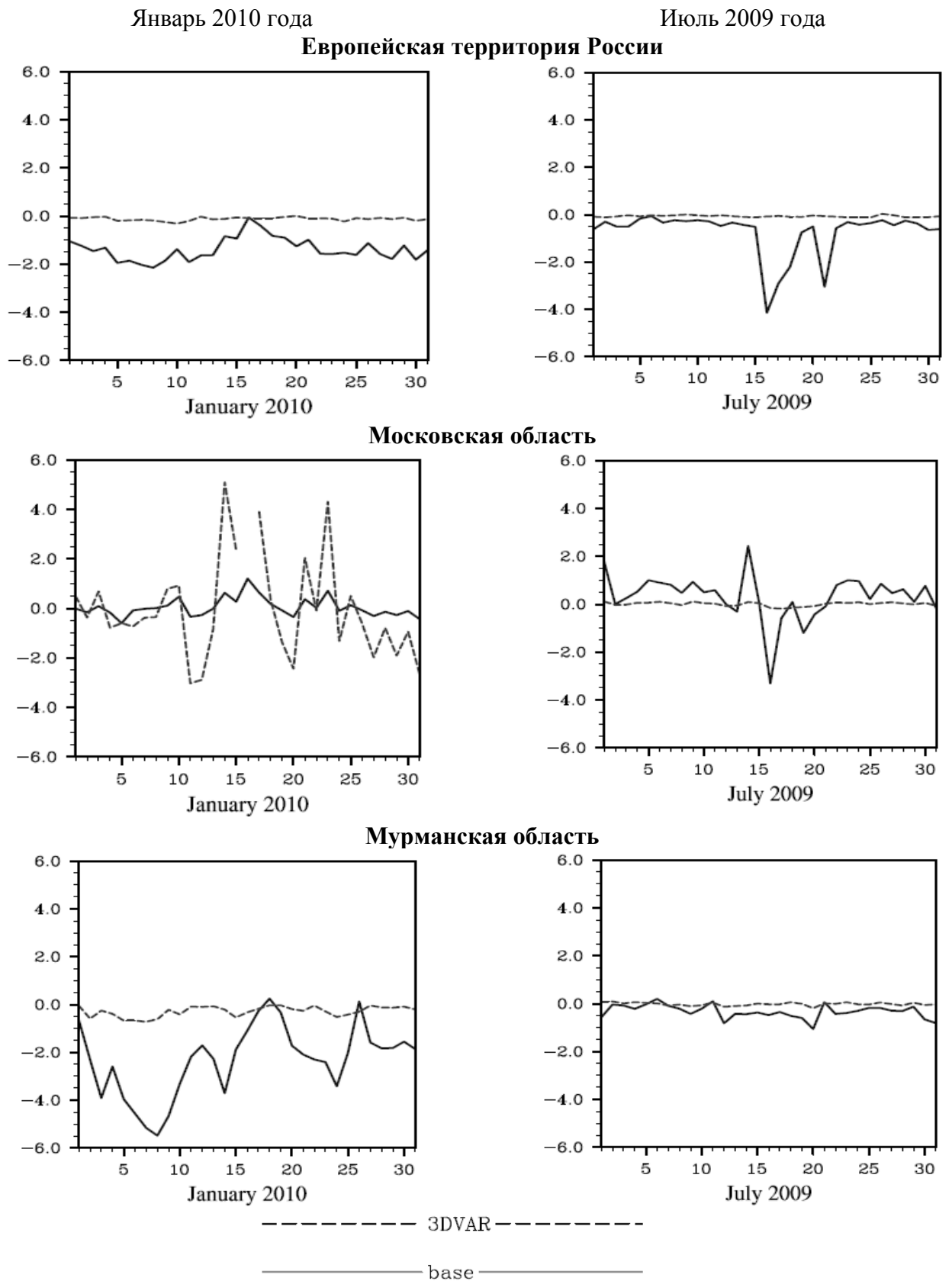
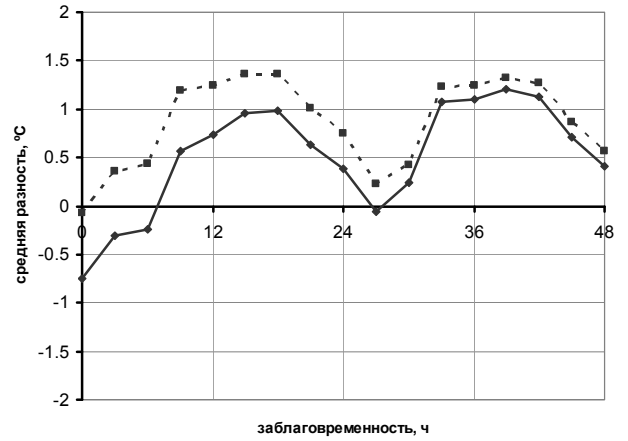
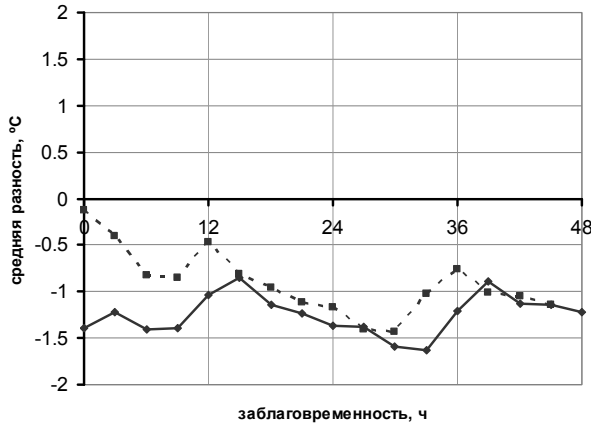


Рис. 2. Средняя разность температуры между данными анализа и наблюдениями на станциях.

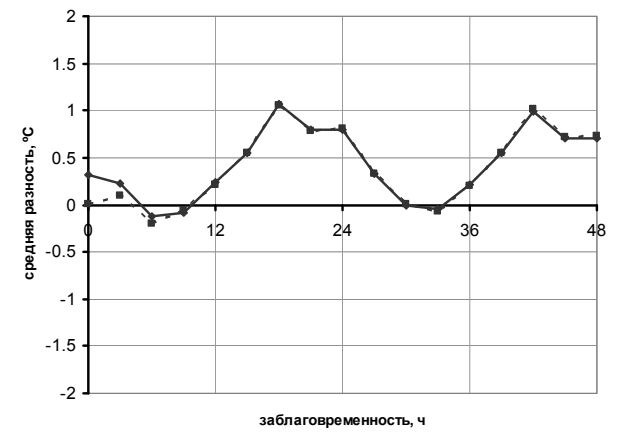
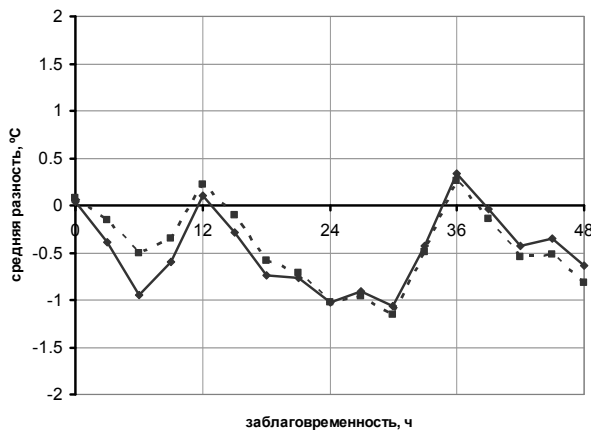
Январь 2010 года

Июль 2009 года

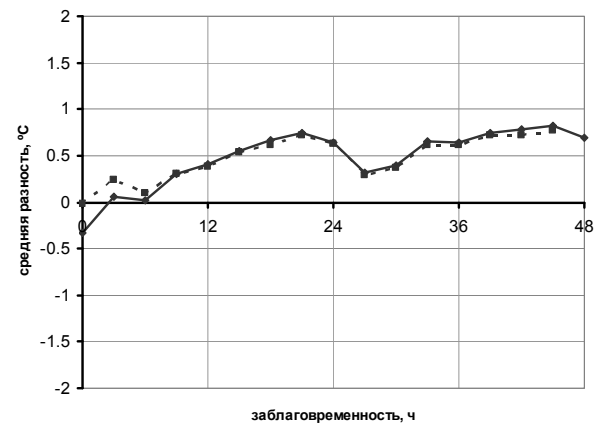
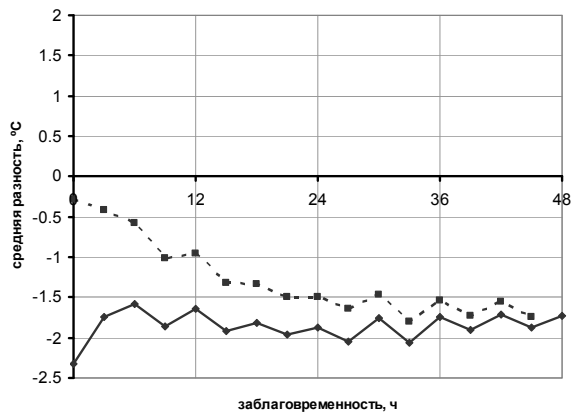
Европейская территория России



Московская область



Мурманская область



—●— WRF

- -■ - - 3DVAR

Рис. 7. Среднемесячные ошибки прогноза температуры в зависимости от заблаговременности прогноза.