

СИСТЕМА МЕЗОМАСШТАБНОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ COSMO-RU: АНСАМБЛЕВЫЙ ПРОГНОЗ

Д.Ю. Алферов, Г.С. Ривин

*Гидрометеорологический научно-исследовательский
центр Российской Федерации
dalferov@mecom.ru, Gdaly.Rivin@mecom.ru*

Введение

Ограниченная предсказуемость атмосферных процессов и вытекающая из нее необходимость их вероятностного описания были впервые выявлены в 1960-е гг. в работах Э. Лоренца [13, 14]. Единственным реально осуществимым способом получения таких прогнозов оказалось вычисление некоторого множества численных прогнозов – прогностического ансамбля. Вычисление таких ансамблей в оперативном режиме стало возможным лишь в конце 1980-х – начале 1990-х гг. с развитием вычислительной техники [7]. В это время метеослужбами европейских стран, США, Канады, Австралии, ЮАР, Японии, а также Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП, ECMWF) разработан ряд систем ансамблевого прогноза погоды, преимущественно на основе глобальных атмосферных моделей.

В последнее десятилетие, с дальнейшим развитием вычислительной техники и технологии параллельных вычислений, стала актуальной задача мезомасштабного ансамблевого прогноза погоды. В настоящее время системы мезомасштабного ансамблевого прогнозирования погоды внедрены или внедряются в ряде метеослужб Европы и США.

В России развитие систем ансамблевого прогноза погоды до недавнего времени сдерживалось нехваткой необходимой для этого

высокопроизводительной вычислительной техники, позволяющей в сжатые сроки проводить расчеты атмосферных процессов на большой территории с высоким разрешением, что особенно важно в случае ансамблевого прогнозирования, для которого требуется одновременный расчет нескольких прогнозов. Тем не менее уже в 2000-х гг. в Гидрометцентре России была разработана система ансамблевого долгосрочного прогноза [6], а также система глобального ансамблевого прогноза на основе глобальной спектральной атмосферной модели Гидрометцентра России [1].

Системы мезомасштабного ансамблевого прогнозирования погоды до настоящего момента в России не существовало. Таким образом, рассматриваемая в данной работе система является первой подобной системой в нашей стране.

При построении прогностических ансамблей выделяются два основных источника неточностей в прогнозе: погрешности начальных данных (возникающие из-за погрешностей наблюдений и анализа) и погрешности самой модели (за счет неточности дифференциальной постановки задачи, дискретизации дифференциальных уравнений и неточностей в описании процессов подсеточного масштаба).

Прогностический ансамбль, как правило, состоит из невозмущенного (контрольного) прогноза и возмущенных прогнозов, которые называются членами ансамбля. Иногда в качестве членов ансамбля также берутся прогнозы нескольких различных моделей (мультимодельный подход).

Обычным методом формирования прогностического ансамбля на основе одной модели является внесение искусственных случайных возмущений масштаба обычно возникающих ошибок в начальные данные модели или входящие в ее уравнения эмпирические параметры (параметризации подсеточных процессов).

Для построения ансамблей с возмущением начальных данных разработан ряд методов, улучшающих воспроизведение в ансамбле наиболее критичных для данного прогноза, т.е. наиболее быстро растущих, ошибок. Наиболее известны из них метод сингулярных векторов и бридинг-метод (метод «выращивания» наиболее быстро растущих мод). Метод сингулярных векторов, разработанный в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды [16], основан на вычислении

наиболее быстро растущих возмущений – сингулярных векторов прогностического оператора. Бридинг-метод разработан в метеослужбе США (NCEP) [21, 22]. Этот метод основан на добавлении в качестве новых возмущений в ансамбль реально возникающих расхождений между ранее запущенными возмущенными прогнозами и контрольным прогнозом, приведенных к масштабу исходного случайного возмущения (рис. 1).

Для мезомасштабного ансамблевого прогноза существует еще один метод возмущения начальных и боковых граничных условий – использование различных «материнских» глобальных моделей. Это могут быть как просто несколько различных глобальных моделей (такой подход используется, к примеру, в системе ансамблевого прогноза COSMO-SREPS [15]), так и члены некоторого глобального прогностического ансамбля (на этом основана система COSMO-LEPS [17]).

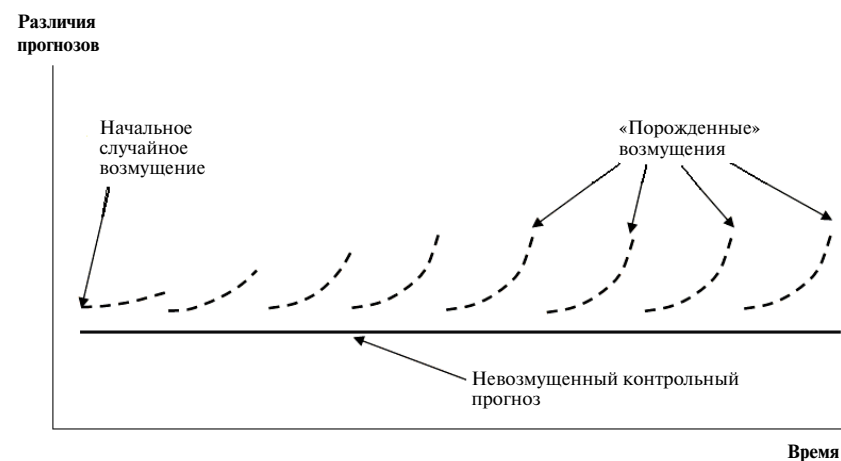


Рис. 1. Схема бридинг-метода [11].

Также широко используется возмущение эмпирических параметров и варьирование используемых схем параметризации подсеточных процессов, а также варьирование самих моделей, что позволяет компенсировать погрешности моделирования.

Схема ансамблевого прогноза показана на рис. 2. Крестиком помечены начальное состояние и результаты детерминированного

контрольного прогноза. Черные кружки – фактическая погода в соответствующие моменты времени. Белыми кружками отмечены возмущенные прогнозы. Серые диаграммы слева и справа показывают распределение вероятностей для начального и конечного состояний. Черные линии обозначают положение фактических данных (жирная линия) и детерминированного прогноза (тонкая линия).

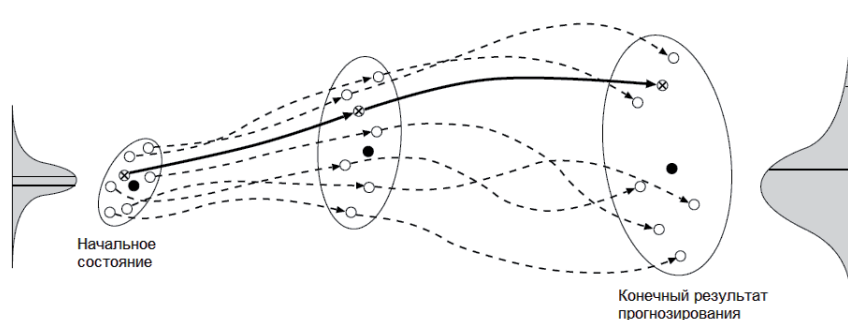


Рис. 2. Схема ансамблевого прогноза с возмущенными начальными условиями [12].

Мы видим, что разброс в ансамбле растет со временем, при этом среднее по полученным прогнозам при достаточно большом количестве членов ансамбля и хорошо подобранном возмущении может оказаться точнее, чем результат детерминированного прогноза. На этом и основан полезный эффект от использования прогностических ансамблей. Кроме того, наличие нескольких прогнозов с определенным разбросом на один и тот же срок дает возможность оценить вероятность тех или иных явлений погоды (к примеру, определенных значений осадков или температуры на заданном уровне), т.е. получить вероятностный прогноз.

Метод построения ансамбля прогнозов и численные эксперименты

Для построения ансамбля используется мезомасштабная негидростатическая атмосферная модель COSMO-RU [2, 3] с шагом сетки 14 км (COSMO-RU/14). Это связано с высокой скоростью вычисления такого ансамбля на вычислительной системе, имеющейся в Гидрометцентре

России: прогноз на 78 часов с помощью модели COSMO-RU/14 при проведении параллельных вычислений на 1024 ядрах суперкомпьютера SGI ALTIX 4700 занимает примерно 2,5 минуты.

Возмущение в ансамбле строится путем варьирования используемых в модели вычислительных схем и параметризаций физических процессов. Эксперименты с заданием возмущений в ансамбле путем варьирования блоков параметризации подсеточных процессов проводились метеослужбами Италии, Греции и Швейцарии в рамках одной из функционирующих в настоящее время систем мезомасштабного ансамблевого прогноза погоды на основе модели COSMO – системы COSMO-SREPS [15]. Кроме того, аналогичный подход использовался в разрабатываемой метеослужбой Германии ансамблевой системе конвекционного масштаба COSMO-DE-EPS (шаг сетки – 2,8 км), использующей помимо этого варьирование начальных условий и системы усвоения данных [18]. Варьирование вычислительных схем ранее в проектах мезомасштабного ансамблевого прогноза консорциума COSMO не применялось.

В первых экспериментах применялся ансамбль, имевший 24 члена. Они различались выбором вычислительных схем (схема чехарды и схема Рунге–Кутты второго порядка), схем параметризации конвекции (схема Тидтке [20] и схема Кайна–Фрицша [9, 10]), а также различным учетом характерного размера подсеточных термических неоднородностей поверхности pat_len и максимального линейного масштаба турбулентных вихрей tur_len . По умолчанию в модели последние две характеристики равны 500 м. В ансамбле дополнительно использовались значения pat_len , равные 0 и 10000 м (границы допустимого для данного параметра интервала) и масштаб tur_len , равный 1000 м (верхний предел для значений данного параметра).

В первых экспериментах проводился прогноз на 24 ч по данным за 00 ч ВСВ трех дней в мае, июле и октябре 2010 года. В качестве изучаемых ансамблевых прогнозов рассматривались прогнозы общей облачности, суточной суммы осадков, удельной приземной влажности и температуры на высоте 2 м над поверхностью земли. Результаты этих экспериментов показали, что возмущение масштаба турбулентных вихрей вносит лишь небольшой вклад в разброс, возникающий в ансамбле, поэтому в дальнейшем от его использования при выборе членов ансамбля было решено отказаться.

В таблице приведен окончательный список из 28 членов ансамбля. Дополнительные члены введены с помощью схемы Рунге–Кутта второго порядка с невозрастанием полной вариации численного решения (TVD), явной схемы для боковых граничных условий (в контрольном прогнозе – неявная схема) и варьирования значений коэффициента влияния толщины ламинарного пограничного слоя на потоки тепла $rlam_heat$ (варьирование дало хорошие результаты в экспериментах с системой COSMO-SREPS [15]).

Запускающий скрипт UNIX для каждого члена ансамбля представляет собой запускающий скрипт модели COSMO-RU/14, в namelist-ы которого внесены соответствующие изменения (см. таблицу). Для удобства запуск этих скриптов реализован в виде одного запускающего скрипта с заданием даты прогноза. Для прогнозов по старым данным предусмотрена возможность вычисления тестового 6-часового прогноза на тот же срок, что и ансамблевого 78-часового. Члены ансамбля чаще всего вычисляются последовательно, поскольку для запуска нескольких модельных прогнозов одновременно свободных процессоров на существующей суперЭВМ, как правило, недостаточно.

Для обработки результатов прогноза и его верификации была разработана программа на языке Фортран. С ее помощью находятся следующие величины: средний прогноз по ансамблю (медиана прогнозируемых значений членов ансамбля в каждой точке сетки), разброс в ансамбле и прогнозы вероятностей (например, для осадков или температуры) для событий вида «прогнозируемые значения больше или меньше заданного значения». Кроме того, вычисляются средний и максимальный разброс в ансамбле, оценка Брайера для вероятностных прогнозов ([5]), процент точек, фактическое значение в которых оказалось за пределами прогнозируемого диапазона (outliers), подготавливаются диаграммы Талагранна [19], ROC-кривые [4] и диаграммы надежности [8].

В качестве примера результатов работы системы рассмотрим прогноз температуры на высоте 2 м над уровнем земли на 06 ч ВСВ 3 августа 2010 года по исходным данным за 00 ч ВСВ 31 июля 2010 года. На рис. 3 изображена карта-«спагетти» (spaghetti plots – карты, изображающие одну и ту же изолинию по прогнозу различных членов ансамбля) для изотермы 25 °С.

Окончательный состав ансамбля

Вычислительная схема	Граничные условия	Физика		
		Схема конвекции	Характерный размер подсеточных термических неоднородностей поверхности (м) (pat_len)	Коэффициент влияния толщины ламинарного пограничного слоя на потоки тепла ($rlam_heat$)
Чехарда	Стандартные	Тидтке	0	0,1
				1,0
				10,0
		500	0,1	
			1,0	
			10,0	
	10000	0,1		
		1,0		
		10,0		
	Кайн–Фрицш	0	0,1	
			1,0	
			10,0	
500		0,1		
		1,0		
		10,0		
10000	0,1			
	1,0			
	10,0			
Явная формулировка	Тидтке Кайн–Фрицш	500	1,0	
Рунге–Кутта	Стандартные	Тидтке Кайн–Фрицш	500	1,0
	Явная формулировка	Тидтке Кайн–Фрицш		
	Стандартные	Тидтке Кайн–Фрицш		
Рунге–Кутта с невозрастанием полной вариации	Явная формулировка	Тидтке Кайн–Фрицш		

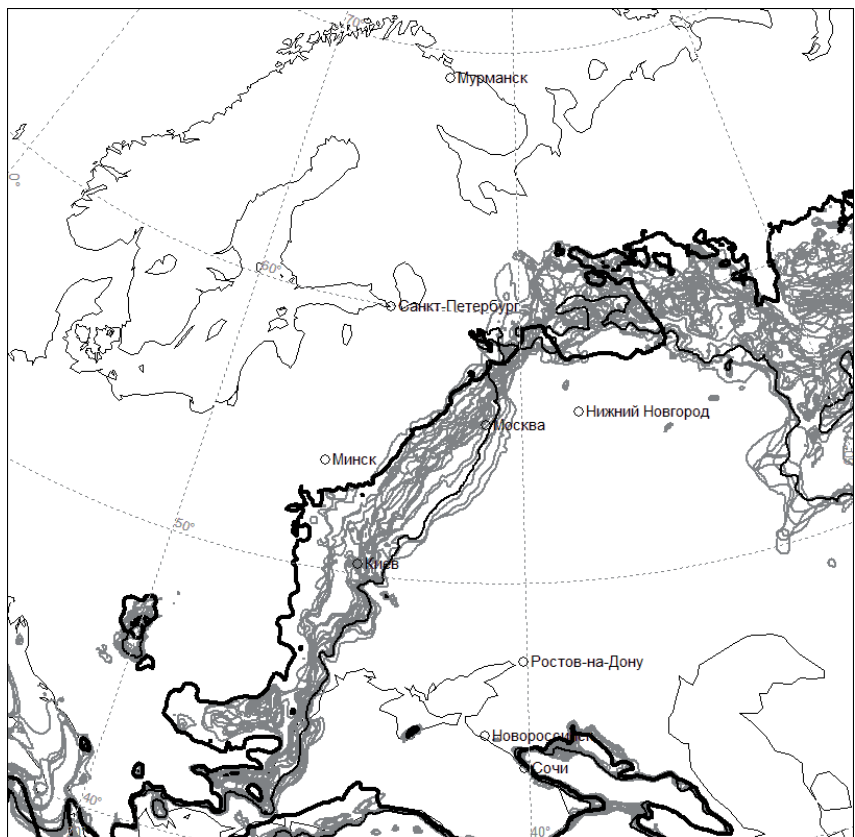


Рис. 3. Карты-«спагетти» изотермы 25 °С по прогнозу на 06 ч ВСВ 3.08.2010 г. по данным за 00 ч ВСВ 31.07.2010 г.
Тонкой черной линией выделен контрольный невозмущенный прогноз, жирной – 6-часовой прогноз на тот же срок.

Хорошо видны области с меньшим и большим разбросом значений. Это показывает способность построенного ансамбля давать априорную оценку качества прогноза: чем больше разброс в ансамбле, тем ниже предсказуемость и больше вероятность ошибки в прогнозе. Кроме того, видно, что прогноз отдельных членов может приближаться к заведомо более точному 6-часовому прогнозу ближе, чем контрольный

прогноз. Тем самым ансамбль уточняет детерминированный прогноз температуры на высоте 2 м. Средний по ансамблю прогноз (поточечная медиана прогнозируемых значений) в данном случае показал снижение средней абсолютной ошибки на 0,5 градуса (22,2 % от исходного значения) и средней квадратической ошибки (RMS) на 0,8 градуса (соответственно 27,1 %).

На рис. 4 приведена ранжированная диаграмма Талаграна, построенная по ряду прогнозов температуры на высоте 2 м по данным за май, июль, август, октябрь и декабрь 2010 года, а также за январь 2011 года. Хорошо видно, что разброс в ансамбле хотя и недостаточен, но практически не имеет смещения в сторону переоценки или недооценки фактического состояния рассматриваемого поля, а доля фактических значений, не попавших в предсказанный диапазон, сравнительно невелика.

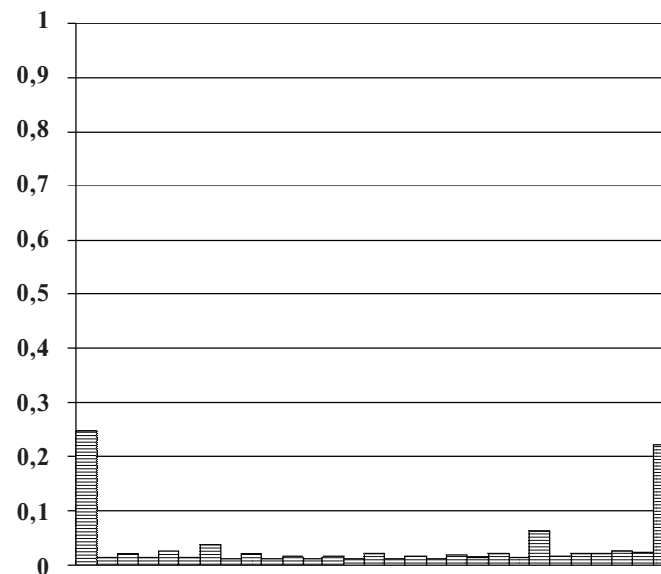


Рис. 4. Диаграмма Талаграна для прогноза T2м.

Препроцессинг для каждого члена ансамбля выполняется на 16 процессорах, основной счет модели – на 256 процессорах. Таким

образом, время выполнения полного ансамблевого прогноза на 78 часов в настоящее время составляет около 7 часов. При возможности работы на 1024 процессорах это время может быть сокращено до 2 часов.

Время вычисления прогноза получается достаточно большим, поэтому имеет смысл сократить число членов ансамбля. В первую очередь следует исключить члены, систематически дающие худшие прогнозы. По результатам экспериментов такими представляются члены, в которых характерный размер подсеточных термических неоднородностей поверхности равен 10000 м.

Еще одним способом сокращения числа вычислений может быть, к примеру, «прореживание» ансамбля, когда во время счета с некоторой периодичностью проверяется близость текущих результатов прогноза к контрольному прогнозу, и далее вычисляются лишь члены, показавшие наибольшие расхождения с контрольным прогнозом. Эта процедура в настоящее время пока не реализована, и ее исследование остается для дальнейшей работы.

Заключение

В результате проведенной работы была построена экспериментальная система мезомасштабного ансамблевого прогноза погоды, неплохо оценивающая неопределенности в прогнозах, а также позволяющая уточнить детерминированный прогноз атмосферных полей. Помимо прогноза температуры, рассмотренного выше, заметное снижение ошибок достигается в прогнозе осадков.

Кроме того, в процессе работы был исследован возможный вклад в ансамбль ряда параметров и методов, используемых в модели COSMO. Сформулированы рекомендации по их использованию, а также намечены возможные пути сокращения времени вычисления ансамблевого прогноза.

Построенная система ансамблевого прогноза является первой в России прогностической системой подобного рода и использует мировой опыт мезомасштабного ансамблевого прогнозирования, в том числе опыт зарубежных систем на основе модели COSMO.

Выражаем глубокую признательность Е.Д. Астаховой и И.А. Розинкиной за полезное обсуждение работы на различных ее этапах.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 гг.» по составной части темы «МЕГАПОЛИС – интегрированные технологии оценки загрязнения атмосферы крупных городов в региональном и глобальном масштабах на основе аэрокосмического и наземного мониторинга для уменьшения негативных последствий антропогенных воздействий».

Список использованных источников

1. Астахова Е.Д. Построение ансамблей начальных полей для системы кратко- и среднесрочного ансамблевого прогнозирования погоды // Труды Гидрометцентра России. – 2008. – Вып. 342. – С. 98–117.
2. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 1. – С. 5–17.
3. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 8. – С. 5–20.
4. Муравьев А.В., Вильфанд Р.М. О стандартизации оценок качества среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 12. – С. 24–34.
5. Муравьев А.В., Куликова И.А. Оценка экономической эффективности ансамблей гидродинамических прогнозов на основе вероятностных оценок качества // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 11. – С. 17–26.
6. Муравьев А.В., Куликова И.А., Круглова Е.Н., Казначеева В.Д. Использование ансамблей в прогнозе метеорологических полей // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 7. – С. 5–17.
7. Ситников И.Г., Полякова И.В. Практическое применение ансамблей гидродинамических прогнозов метеорологических полей // Метеорология и гидрология. – 1997. – № 8. – С. 113–118.
8. Hsu W.-R., Murphy A.H. The attributes diagram: A geometrical framework for assessing the quality of probability forecasts // Int. J. Forecasting. – 1986. – Vol. 2, Iss. 3. – P. 285–293.
9. Kain J., Fritsch J. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme // The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models, Meteor. Monogr. – Boston.: American Meteorological Society, 1993. – Vol. 24, N 46. – P. 165–170.

10. *Kain J.* The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update // *J. of Applied Meteorology*. – 2004. – Vol. 43, N 1. – P. 170–181.
11. *Kalnay E.* Atmospheric modelling, data assimilation and predictability. – Cambridge university press, 2003. – 341 p.
12. *Keller J.D.* Ensemble initialization using the breeding technique in a new ensemble forecasting system based on the numerical weather prediction model GME // Dissertation «Meteorologisches Institut der Rhein». – Friedr.-Wilh.-Universität Bonn, 2008. – 109 p.
13. *Lorenz E.N.* A deterministic non-periodic flow // *J. Atmos. Sci.* – 1963. – Vol. 20. – P. 130–141.
14. *Lorenz E.N.* A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model // *Tellus*. – 1965. – Vol. 17. – P. 321–333.
15. *Marsigli C.* COSMO Priority Project «Short Range Ensemble Prediction System» (SREPS): Final Report // COSMO Technical Report N 13. – Deutscher Wetterdienst, 2009. – 32 p.
16. *Molteni F., Buizza R., Palmer T.N., Petroliagis T.* The ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and validation // *Q. J. Roy. Met. Soc.* – 1996. – Vol. 122. – P. 73–119.
17. *Montani A., Cesari D., Marsigli C., Paccagnella T.* Seven years of activity in the field of mesoscale ensemble forecasting by the COSMO-LEPS system: main achievements and open challenges // COSMO Technical Report N 19. – Deutscher Wetterdienst, 2010. – 28 p.
18. *Peralta C., Buchhold M.* Initial condition perturbations for the COSMO-DE-EPS // COSMO Newsletter N 11. – Deutscher Wetterdienst, 2011. – P. 115–123.
19. *Talagrand O., Vautraud R., Strauss B.* Evaluation of probabilistic prediction systems // Proceedings of the workshop on predictability. – ECMWF, 1998. – P. 1–25.
20. *Tiedtke M.* A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models // *Mon. Wea. Rev.* – 1989. – Vol. 117, N 8. – P. 1779–1800.
21. *Toth Z., Kalnay E.* Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations // *Bull. Am. Met. Soc.* – 1993. – Vol. 74. – P. 2317–2330.
22. *Toth Z., Kalnay E.* Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method // *Mon. Wea. Rev.* – 1997. – Vol. 125. – P. 3297–3319.

Поступила в редакцию 21.06.2011 г.