

*Д.Б. Киктёв¹, М.А. Толстых¹, Р.Б. Зарипов¹, М.Ю. Зайченко¹, А.В. Муравьев¹,
Е.Н. Круглова¹, И.А. Куликова¹,
В.П. Мелешко², В.М. Мирвис², В.А. Матюгин², Т.Ю. Львова²*

СОВМЕСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ГЛОБАЛЬНОГО СЕЗОННОГО ПРОГНОЗА НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ И ГГО

Введение

В течение нескольких лет в ГУ «Гидрометцентр России» (ГМЦ) и ГУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» (ГГО) развивались технологии глобального ансамблевого прогноза на срок до сезона [1, 3–6]. В качестве основы этих технологий в ГМЦ использовались модели атмосферы ПЛИАВ [8] и T41L15 [2, 5, 6], а в ГГО – модель T42L14 [9].

В 2007–2008 гг. были проведены совместные оперативные испытания технологий глобального сезонного метеорологического прогноза температуры и осадков на основе указанных моделей общей циркуляции атмосферы ГМЦ и ГГО по согласованной программе. Результаты испытаний были рассмотрены на заседании Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета (ЦМКП) 27 октября 2009 года. Ниже рассматриваются условия, основные результаты и итоги этих испытаний.

Условия проведения испытаний

По условиям испытаний прогнозы рассчитывались в оперативном режиме ежемесячно на три последующих месяца с заблаговременностью (промежуток времени от момента старта модели до начала первого календарного месяца прогноза) 3–5 суток и предоставлялись для обмена до наступления периода прогноза. Общий объем испытательной выборки составил 24 прогноза.

Граничные условия по температуре поверхности океана (ТПО) задавались исходя из последних данных анализа средних за неделю фактических значений ТПО [13], доступных на сайте <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/NOAA/NCEP/EMC/CMB/GLOBAL> к моменту составления прогноза. Распределение начальных аномалий ТПО принималось постоянным в течение всего периода прогноза.

¹ Гидрометцентр России

² Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова

В качестве начальных данных использовались результаты оперативного объективного анализа метеорологических полей, выполняемого в ГМЦ. Ансамбли прогнозов рассчитывались от слабо возмущенных начальных полей. Возмущенные начальные поля для моделей ПЛАВ и T42L14 строились с использованием метода выращивания возмущений [7, 14] и включали, соответственно, девять и семь прогностических реализаций. Ансамбли прогнозов по модели T41L15 рассчитывались с использованием начальных полей за шесть последовательных сроков наблюдений.

Состав оцениваемых прогнозируемых метеорологических величин включал средние месячные и сезонные аномалии геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа (H500), атмосферного давления на уровне моря (SLP), температуры воздуха на уровне 850 гПа (T850) и у Земли (T2m), атмосферных осадков (PREC), а также их прогностические вероятности для трех градаций («норма», «выше/ниже нормы»).

Прогностические аномалии определялись как отклонения ожидаемых средних месячных/сезонных значений метеорологических параметров от соответствующих средних многолетних значений («модельного климата»), полученных по результатам ретроспективных прогнозов. Прогностические вероятности рассчитывались исходя из частот попадания членов прогностического ансамбля в градации, ограниченные терцилями модельного климатического вероятностного распределения для соответствующего месяца или сезона года.

Выбор периода для расчета модельного климата (средних, стандартных отклонений, границ терцилей вероятностного распределения) условиями испытаний не регламентировался. В ГМЦ параметры модельного климатического распределения оценивались за период с 1979 по 2003 г., а в ГГО – с 1982 по 2004 г. Ряды ретроспективных прогнозов ГМЦ были рассчитаны по данным Реанализа-II (NCEP/NCAR) [12], ГГО – по данным Реанализа-I (NCEP/NCAR) [11]. Заблаговременность ретроспективных прогнозов примерно соответствовала заблаговременности оцениваемых реальных прогнозов.

По условиям испытаний какая-либо статистическая коррекция результатов моделирования, помимо простого вычитания модельного климата, для расчета прогностических аномалий не использовалась.

Программа испытаний предусматривала сравнение прогностических переменных с фактическими (эталонными) данными в узлах сетки с шагом $2,5^\circ$ по широте и долготе для трех регионов: тропики (20° с.ш.– 20° ю.ш.), северные экваториальные тропики ($\geq 20^\circ$ с.ш.), территория России (30 – 180° в.д., 50 – 70° с.ш.).

Для оценки успешности прогнозов аномалий рассчитывались: средняя квадратическая ошибка (RMSE), коэффициент корреляции аномалий (AC), показатель MSSS (мастерство прогноза по сравнению с климатом), а также оправдываемость прогнозов знака аномалий (ρ).

Вероятностные прогнозы по трем градациям («норма», «выше/ниже нормы») оценивались с помощью критерия ROC (Relative Operating Characteristics), включенного в состав Стандартизированной системы проверки долгосрочных прогнозов (<http://meteoinfo.ru/gdpfs-manual>) [15].

Параметры эталонного климата, использованного для расчетов фактических аномалий H500, SLP, T850 и T2м оценивались за период с 1979 по 2003 г. по данным Реанализа-II (NCEP/NCAR) [12]. Эталонный климат для осадков оценивался за период с 1979 по 2004 г. по данным архива CAMS_OPI (NCEP CPC) [10].

Оценки успешности прогнозов были рассчитаны независимо в ГГО и в ГМЦ и впоследствии согласованы.

Результаты испытаний

Результаты оперативных испытаний показали:

– по критерию RMSE в северных экстра-тропиках различия в успешности прогнозов на основе модели ПЛАВ и T42L14 были в целом невелики (табл. 1). При этом для прогнозов SLP и PREC во все периоды лучшими были показатели успешности прогнозов модели T42L14. Для T850 и T2м меньшие величины RMSE на территории России имели сезонные прогнозы по модели ПЛАВ. В тропиках прогнозы по модели T42L14 показали наименьшие значения RMSE по всем переменным. Ошибки прогнозов модели T41L15 для всех регионов и периодов существенно превышали ошибки по двум другим моделям. В связи с этим основное внимание уделено анализу результатов прогнозов по моделям ПЛАВ и T42L14;

Таблица 1

Оценки RMSE (°C) прогнозов температуры на уровне 2 м в 2007–2008 гг.

		Сев. полушарие (20–90°с.ш.)	Тропики (20°ю.ш.–20°с.ш.)	Россия (30–180°в.д., 50–70°с.ш.)
1-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	1,79	0,64	2,45
	ГГО	1,74	0,56	2,49
	ГМЦ+ГГО	1,67	0,57	2,35
2-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	1,86	0,67	2,43
	ГГО	1,85	0,65	2,56
	ГМЦ+ГГО	1,80	0,63	2,42
3-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	1,84	0,72	2,40
	ГГО	1,83	0,70	2,53
	ГМЦ+ГГО	1,79	0,68	2,40
Сезон	ГМЦ (ПЛАВ)	1,31	0,57	1,53
	ГГО	1,32	0,53	1,71
	ГМЦ+ГГО	1,27	0,53	1,55

– по критерию MSSS в северных экстра-тропиках и на территории России методические прогнозы T850 и T2м на месяц и сезон имели преимущество перед климатическими прогнозами (табл. 2). В тропиках прогнозы ГУ «ГГО» были успешнее климатических по всем переменным за исключением осадков. Для 2-го и 3-го месяцев ошибки методических прогнозов, как правило, были не меньше ошибок климатических прогнозов;

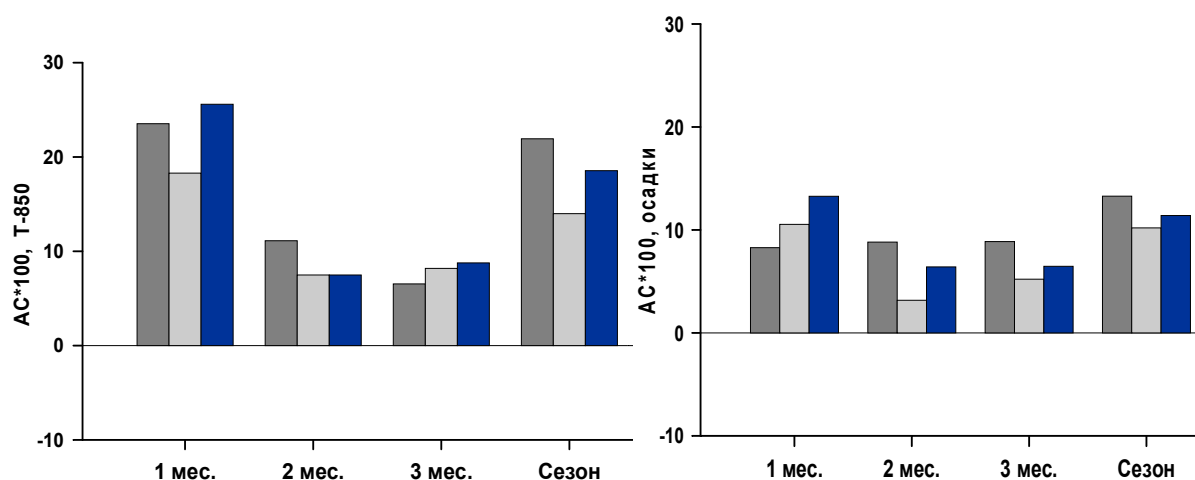
Таблица 2

Оценки MSSS прогнозов температуры на уровне 2 м в 2007–2008 гг.

		Сев. полушарие (20–90°с.ш.)	Тропики (20°ю.ш.–20°с.ш.)	Россия (30–180°в.д., 50–70°с.ш.)
1-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,10	0,10	0,20
	ГГО	0,15	0,33	0,18
	ГМЦ+ГГО	0,21	0,28	0,26
Сезон	ГМЦ (ПЛАВ)	0,12	0,06	0,29
	ГГО	0,10	0,23	0,13
	ГМЦ+ГГО	0,17	0,21	0,28

– в первый месяц по критерию АС в большинстве случаев наивысшие показатели успешности продемонстрировали прогнозы ГУ «ГГО». Для сезона в целом на территории России более успешными были прогнозы температуры (T850, T2м) по модели ПЛАВ (рисунок, табл. 3);

– по критерию ρ относительное преимущество моделей ГУ «Гидрометцентр России» и ГУ «ГГО» менялось в зависимости от метеорологического параметра, заблаговременности и региона. В целом сравниваемые модели показали сопоставимые по уровню успешности результаты. (табл. 4, 5). В подавляющем большинстве случаев методические прогнозы имели преимущество перед климатическими прогнозами;



Сравнительные оценки АС прогнозов T850 и осадков по региону северные экстра-тропики (20–90° с.ш.) на срок до сезона.

■ – ГМЦ (ПЛАВ); ■ – ГМЦ (Т41L15); ■ – ГГО (Т42L14)

Таблица 3

Оценки АС прогнозов температуры на уровне 2 м в 2007–2008 гг.

		Сев. полушарие (20–90°с.ш.)	Тропики (20°ю.ш.–20°с.ш.)	Россия (30–180°в.д., 50–70°с.ш.)
1-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,29	0,40	0,20
	ГГО	0,32	0,55	0,26
	T4IL15	0,11	-0,06	0,21
	ГМЦ+ГГО	0,37	0,52	0,28
2-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,11	0,36	0,09
	ГГО	0,12	0,40	0,03
	T4IL15	0,08	-0,08	0,12
	ГМЦ+ГГО	0,14	0,41	0,09
3-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,08	0,30	0,08
	ГГО	0,13	0,33	0,06
	T4IL15	0,10	-0,08	0,10
	ГМЦ+ГГО	0,13	0,32	0,11
Сезон	ГМЦ (ПЛАВ)	0,24	0,42	0,22
	ГГО	0,23	0,51	0,12
	T4IL15	0,12	-0,09	0,16
	ГМЦ+ГГО	0,28	0,48	0,21

Таблица 4

Оценки ρ прогнозов температуры на уровне 2 м в 2007–2008 гг.

		Сев. полушарие (20–90°с.ш.)	Тропики (20°ю.ш.–20°с.ш.)	Россия (30–180°в.д., 50–70°с.ш.)
1-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,31	0,40	0,36
	ГГО	0,36	0,46	0,33
	ГМЦ+ГГО	0,38	0,46	0,42
2-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,21	0,34	0,22
	ГГО	0,24	0,36	0,15
	ГМЦ+ГГО	0,24	0,37	0,22
3-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,17	0,28	0,22
	ГГО	0,21	0,28	0,16
	ГМЦ+ГГО	0,23	0,30	0,26
Сезон	ГМЦ (ПЛАВ)	0,31	0,38	0,43
	ГГО	0,34	0,41	0,31
	ГМЦ+ГГО	0,38	0,42	0,46

Таблица 5

Оценки ρ прогнозов осадков в 2007–2008 гг.

		Сев. полушарие (20–90°с.ш.)	Тропики (20°ю.ш.–20°с.ш.)	Россия (30–180°в.д., 50–70°с.ш.)
1-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,12	0,12	0,09
	ГГО	0,09	0,18	0,11
	ГМЦ+ГГО	0,12	0,16	0,13
2-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,05	0,10	0,01
	ГГО	0,01	0,13	-0,04
	ГМЦ+ГГО	0,02	0,05	0,06
3-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,04	0,09	0,03
	ГГО	0,03	0,12	-0,03
	ГМЦ+ГГО	0,04	0,12	0,01
Сезон	ГМЦ (ПЛАВ)	0,08	0,12	0,04
	ГГО	0,05	0,16	0,05
	ГМЦ+ГГО	0,07	0,15	0,08

– по критерию ROC во внетропических широтах Северного полушария оценки прогнозов ГМЦ (ПЛАВ) и ГГО за период испытаний были близки (табл. 6–8). В тропиках прогнозы ГГО показали более высокие оценки. Успешность методических вероятностных прогнозов Т2м по территории России заметно превышала уровень климатических прогнозов. Превышение успешности прогнозов осадков над уровнем случайного прогноза было незначительным.

Таблица 6

Оценки ROC прогнозов температуры на уровне 2 м в 2007–2008 гг.

		Сев. полушарие (20–90°с.ш.)	Тропики (20°ю.ш.–20°с.ш.)	Россия (30–180°в.д., 50–70°с.ш.)
1-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,65	0,69	0,68
	ГГО	0,68	0,72	0,67
	ГМЦ+ГГО	0,69	0,73	0,70
2-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,62	0,67	0,62
	ГГО	0,62	0,67	0,60
	ГМЦ+ГГО	0,64	0,69	0,64
3-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,58	0,62	0,61
	ГГО	0,59	0,62	0,59
	ГМЦ+ГГО	0,60	0,64	0,63
Сезон	ГМЦ (ПЛАВ)	0,66	0,67	0,72
	ГГО	0,67	0,69	0,67
	ГМЦ+ГГО	0,69	0,71	0,73

Таблица 7

Оценки ROC вероятностных прогнозов аномалий H500 в 2007–2008 гг.

		Сев. полушарие (20–90°с.ш.)	Тропики (20°ю.ш.–20°с.ш.)	Россия (30–180°в.д., 50–70°с.ш.)
1-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,60	0,58	0,59
	ГГО	0,59	0,67	0,59
	ГМЦ+ГГО	0,61	0,64	0,61
Сезон	ГМЦ (ПЛАВ)	0,61	0,58	0,57
	ГГО	0,57	0,71	0,54
	ГМЦ+ГГО	0,61	0,67	0,57

Таблица 8

Оценки ROC прогнозов осадков в 2007–2008 гг.

		Сев. полушарие (20–90°с.ш.)	Тропики (20°ю.ш.–20°с.ш.)	Россия (30–180°в.д., 50–70°с.ш.)
1-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,54	0,54	0,54
	ГГО	0,56	0,57	0,55
	ГМЦ+ГГО	0,57	0,57	0,56
2-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,51	0,53	0,50
	ГГО	0,54	0,54	0,50
	ГМЦ+ГГО	0,53	0,54	0,50
3-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,51	0,52	0,51
	ГГО	0,55	0,55	0,52
	ГМЦ+ГГО	0,55	0,55	0,52
Сезон	ГМЦ (ПЛАВ)	0,53	0,54	0,52
	ГГО	0,55	0,57	0,52
	ГМЦ+ГГО	0,55	0,56	0,53

Помимо оценки и взаимного сравнения успешности прогнозов индивидуальных моделей, были получены оценки успешности совместных прогнозов моделей ПЛАВ и Т41L14 (см. графы «ГМЦ+ГГО» в табл. 1–9). При построении совместных прогнозов данные двух этих моделей брались с равными весами.

Таблица 9

Оценки АС прогнозов осадков в 2007–2008 гг.

		Сев. полушарие (20–90°с.ш.)	Тропики (20°ю.ш.–20°с.ш.)	Россия (30–180°в.д., 50–70°с.ш.)
1-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,09	0,14	0,13
	ГГО	0,13	0,24	0,13
	Т41L15	0,11	0,01	0,12
	ГМЦ+ГГО	0,13	0,23	0,17
2-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,09	0,11	–0,03
	ГГО	0,07	0,17	–0,05
	Т41L15	0,04	0,03	0,04
	ГМЦ+ГГО	0,10	0,16	–0,05
3-й месяц	ГМЦ (ПЛАВ)	0,08	0,09	–0,01
	ГГО	0,06	0,16	–0,05
	Т41L15	0,06	0,03	0,07
	ГМЦ+ГГО	0,09	0,15	–0,02
Сезон	ГМЦ (ПЛАВ)	0,13	0,18	–0,03
	ГГО	0,11	0,27	0,01
	Т41L15	0,11	0,03	0,12
	ГМЦ+ГГО	0,14	0,26	–0,01

Результаты испытаний показали:

– для северных экстра-тропиков и территории России совместные прогнозы, как правило, были успешнее прогнозов индивидуальных моделей;

– в тропической зоне в большинстве случаев более успешными были прогнозы ГГО.

На территории России средние квадратические ошибки RMSE совместных прогнозов температуры воздуха Т2м составили 2,3, 2,4, 2,4 и 1,6 °С для 1, 2, 3-го месяцев и сезона соответственно (аналогичные ошибки климатического прогноза были равны 2,7, 2,6, 2,6 и 1,8 °С). Корреляция аномалий на территории России была 0,28, 0,09, 0,11 и 0,21 в 1, 2, 3-й месяцы и сезон соответственно. Совместный вероятностный прогноз также имел наиболее высокие показатели успешности.

Выводы об успешности прогнозов, полученные по данным оперативных испытаний, в целом согласуются с выводами, полученными по ряду ретроспективных прогнозов. В частности, подтверждается относительно более высокая успешность прогнозов в тропиках. Успешность прогнозов сезонных аномалий приземной температуры воздуха во внетропических широтах и в среднем по территории России лишь немного выше успешности климатического прогноза, что в основном обеспечивается относительно успешным прогнозом на первый месяц. Успешность прогнозов осадков остается низкой по всем регионам.

Заключение

В соответствии с рекомендациями ЦМКП:

– в оперативную практику в качестве консультативных были внедрены технологии глобальных вероятностных прогнозов аномалий H500, атмосферного давления на уровне моря, температуры воздуха на уровне 850 гПа и у Земли, а также атмосферных осадков на основе моделей ПЛАВ (ГМЦ) и T42L14 (ГГО) на срок до сезона;

– обеспечено регулярное предоставление прогностической информации на срок до сезона и мультимодельных вероятностных прогнозов, основанных на моделях ПЛАВ и T42L14, а также информации об оправдываемости прогнозов в период оперативных испытаний для пользователей Североевразийского климатического центра (<http://seakc.meteoinfo.ru>);

– продолжаются совместные исследования по совершенствованию технологий метеорологических прогнозов на срок до сезона на основе развития моделей атмосферы высокого разрешения, улучшения схем параметризации физических процессов, привлечения более полной фактической информации, оптимизации процедур интерпретации результатов моделирования и построения мультимодельных ансамблей.

Испытывавшаяся в 2007–2008 гг. версия модели ПЛАВ была практически неизменной в ходе испытаний и в основном соответствовала версии ПЛАВ-2005. Параллельно в Гидрометцентре России велась работа по подготовке новой версии модели. Была заменена параметризация процессов на поверхности суши. Реализована более совершенная параметризация пропорций облачности в ячейках сетки. Заменена параметризация влияния снега на альбедо и излучательную способность поверхности. В описание погранслоя введена "интерактивная" длина перемешивания, обеспечивающая лучшее воспроизведение вертикальных профилей скорости и температуры при устойчивой стратификации. Заменена параметризация длинноволновой радиации. В новой версии модели существенно улучшились оценки всех полей в тропиках. Во внетропических широтах оценки, в среднем, тоже улучшились.

В 2008–2009 гг. в ГГО велась активная работа по улучшению схемы прогноза, включающая подготовку и испытание версии модели атмосферы T63L25, имеющей в полтора раза более высокое горизонтальное разрешение и 25 уровней по вертикали. При этом были уточнены схемы параметризации ряда физических процессов и уменьшены систематические ошибки. Испытание модели в режиме ансамблевого прогноза на месяц, включающее 20-летний ряд ежемесячных прогнозов, рассчитанных по данным реанализа, и

2 года еженедельных квази-оперативных прогнозов показали, что успешность прогнозов улучшилась. Особенно заметно это проявилось в начале периода интегрирования.

В соответствии с рекомендацией ЦМКП в ближайшем будущем предполагается начать испытания технологии выпуска прогнозов на месяц с использованием новых версий моделей Гидрометцентра России и ГГО.

Список литературы

1. Киктев Д.Б., Тросников И.В., Толстых М.А., Зарипов Р.Б. Оценки успешности прогнозов сезонных аномалий метеорологических полей для модели SL-AV в эксперименте SMIP-2 // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 6. – С. 16–26.
2. Курбаткин Г.П., Дегтярев А.И., Фролов А.В. Спектральная модель атмосферы, инициализация и база данных для численного прогноза погоды. – СПб.: Гидрометеоздат, 1994. – 184 с.
3. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Гаврилина В.М., Матюгин В.А., Львова Т.Ю. Прогноз метеорологических величин на предстоящий месяц гидродинамико-статистическим методом ГГО. I. Категорические прогнозы – результаты 26-летних серий испытаний // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 1. – С. 5–18.
4. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Гаврилина В.М., Матюгин В.А., Львова Т.Ю. Прогноз метеорологических величин на предстоящий месяц гидродинамико-статистическим методом ГГО. II. Вероятностный прогноз: анализ и интерпретация распределения ансамбля, методика и качество прогнозов // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 2. – С. 5–16.
5. Муравьев А.В. и др. Долгосрочное прогнозирование аномальных синоптических ситуаций. Основные конструктивные и технические характеристики динамико-статистической схемы долгосрочного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. – 1999. – № 3. – С. 28–36.
6. Муравьев А.В. и др. Долгосрочное прогнозирование аномальных синоптических ситуаций. II. Условия эксперимента и результаты прогноза // Метеорология и гидрология. – 1999. – № 4. – С. 5–15.
7. Пичугин Ю.А., Мелешко В.П., Матюгин В.А., Гаврилина В.М. Гидродинамические долгосрочные прогнозы погоды по ансамблю начальных состояний // Метеорология и гидрология. – 1998. – № 2. – С. 5–15.
8. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. – М, Обнинск: ОАО ФОП. – 2010. – 111 с.
9. Шнееров Б.Е., Мелешко В.П. и др. Современная версия глобальной модели общей циркуляции атмосферы ГГО (Версия MGO-2) // Труды ГГО. – 2001. – Вып. 550. – С. 3–43.
10. Janowiak J. E., Xie P. CAMS_OPI: a global satellite-raingauge merged product for real-time precipitation monitoring applications // J. Climate. – 1999. – P. 3335–3342.
11. Kalnay E. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // BAMS. – 1996. – V. 77. – P. 437–470.
12. Kanamitsu M. et al. NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2) // BAMS. – 2002. – V. 83. – P. 1631–1643.
13. Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M., Stokes D.C., Wang W. An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate // J. Climate. – 2002. – V. 15. – P. 1609–1625.
14. Toth Z., Kalnay E. Ensemble Forecasting at NCEP and the Breeding Method // Mon. Wea. Rev. – 1997. – P. 3297–3319.
15. WMO. Standardised verification system (SVS) for long-range forecasts (LRF). New attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-No. 485) // WMO. Geneva – 2002. – V. 1.