

# ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПУСКА ДОЛГОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ СЕВЕРО-ЕВРАЗИЙСКОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА (СЕАКЦ)

*Д.Б. Киктев, В.М. Хан, В.Н. Крыжов, Р.Б. Зарипов,  
Е.Н. Круглова, И.А. Куликова, В.А. Тищенко*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации*

*kiktev@mecom.ru, khan@mecom.ru, kryjov@mecom.ru,  
kruglova@mecom.ru, tischenko@mecom.ru*

## Введение

Особое место в деятельности международных метеорологических центров занимают долгосрочные метеорологические прогнозы. Построение гидродинамической теории крупномасштабных атмосферных процессов связано с рядом сложнейших проблем, одной из которых является проблема предсказуемости. Первоначально в широком смысле это слово связывалось с искусством составления прогнозов. Однако в процессе развития гидродинамических моделей вопрос о предсказуемости был поставлен более строгим образом и связан с неопределенностью численных моделей. Результаты сравнения, проведенного в 80-е годы (1980–1989 гг.), моделей общей циркуляции атмосферы (ОЦА), применяемых в метеорологических центрах (при интегрировании на 10 лет по программе ВМО АМIP), показали, что даже для лучших гидродинамических моделей отрезок времени, называемый интервалом практической предсказуемости, составляет 5–7 суток. По различным оценкам, он может быть увеличен до 2–3 недель в зависимости от сезона, региона и устойчивости атмосферной циркуляции.

Современные методы долгосрочных прогнозов основываются на среднесрочных моделях и их динамико-статистической адаптации для месячных и сезонных прогнозов. За пределами интервала

практической предсказуемости качество методического прогноза мгновенных состояний атмосферы, как правило, находится на уровне случайного. Объектами долгосрочных прогнозов являются средние за период (месяц, сезон) значения аномалий метеорологических величин и вероятности разных категорий аномалий. Физической основой долгосрочных прогнозов служат гипотезы о решающей роли внешних воздействий в долгопериодной динамике атмосферы. В рамках концепции предсказуемости второго рода предполагается, что для больших промежутков времени (месяц и более) состояние атмосферы зависит не столько от начальных условий, сколько от состояния океана и поверхности суши (лед, снежный покров и влажность почвы), являющихся более инерционными, а потому легче прогнозируемыми средами, а также от внешних условий (светимости Солнца, содержания парниковых газов, вулканических выбросов и т.д.). Наиболее важная роль при этом принадлежит морской поверхности, так как вследствие большой теплоемкости воды теплосодержание деятельного слоя моря может быть намного выше, чем деятельного слоя почвы.

За последние годы широкое распространение в мировой метеорологической практике получило прогнозирование на основе ансамблей. Необходимость такого подхода определяется, с одной стороны, недостаточной точностью представления исходных метеорологических и океанографических полей, несовершенством гидродинамических моделей, с другой – хаотическим поведением самой атмосферы. Одним из способов устранения погрешностей, связанных с несовершенством моделей, является использование сразу нескольких моделей – мультимодельный подход, ставший стандартной практикой, в том числе и в области сезонных прогнозов погоды. Преимущества такого подхода в рамках проекта PROVOST продемонстрированы в [13]. Продолжением исследований стал реализованный в ЕЦСПП в период с апреля 2000 г. по сентябрь 2003 года проект DEMETER (<http://www.ecmwf.int/research/demeter/index.html>) [15], в котором участвовало 7 глобальных совместных моделей океана и атмосферы. Полученные результаты свидетельствуют о значительном улучшении оправдываемости прогнозов при использовании мультимодельного подхода. При этом недостатки одной модели в

воспроизведении той или иной синоптической ситуации в данном географическом регионе и сезоне восполняются другой. Не отменяя дальнейшего развития и усовершенствования гидродинамических моделей, мультимодельный подход может служить весьма полезным инструментом повышения качества прогнозов [8]. В России впервые мультимодельный подход реализован в рамках деятельности СЕАКЦ с использованием модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ ФГБУ «Гидрометцентр России» и модели общей циркуляции атмосферы ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» (ГГО). [8].

В данной статье приводится описание основных блоков технологии ежемесячных выпусков глобальных вероятностных и детерминистических прогнозов на месяц и сезон, реализованной в Гидрометцентре России. Ежемесячная процедура составления прогнозов, рассылки результатов и расчетов оценок качества осуществляются в рамках специализированной технологической линии, развернутой на сервере СЕАКЦ. Результаты вероятностных прогнозов сопровождаются синоптической интерпретацией, или обзорной информацией, которая выводится в определенном таблично-текстовом формате, дублируется на английском языке и размещается на сайте СЕАКЦ с использованием локальных и глобальных сетей Интернет. В рамках международного сотрудничества и участия Гидрометцентра России в проекте APCN ежемесячно составляются и передаются координаторам проекта в APCC (г. Пусан, Республика Корея) глобальные ансамблевые прогнозы на 3 месяца с месячной заблаговременностью.

Главные модификации системы связаны с усовершенствованием гидродинамической модели ПЛАВ и переводом технологической линии под операционную систему UNIX. По аналогии со схемой сезонного прогноза реализована согласованная с ГГО технология выпуска глобальных вероятностных и детерминистических еженедельных и месячных прогнозов на срок до 1,5 месяцев. В 2012 г. была принята Программа совместных оперативных испытаний технологий детализированных по времени ансамблевых долгосрочных прогнозов с еженедельной дискретностью выпуска Гидрометцентра России и ГГО и начаты оперативные испытания

по этой программе. В рамках испытаний с использованием глобальной конечно-разностной модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ осуществляется еженедельный выпуск прогнозов в оперативном режиме, которые по глобальной сети Интернет в согласованном формате передаются в ГГО.

## **1. Технология сезонного прогноза**

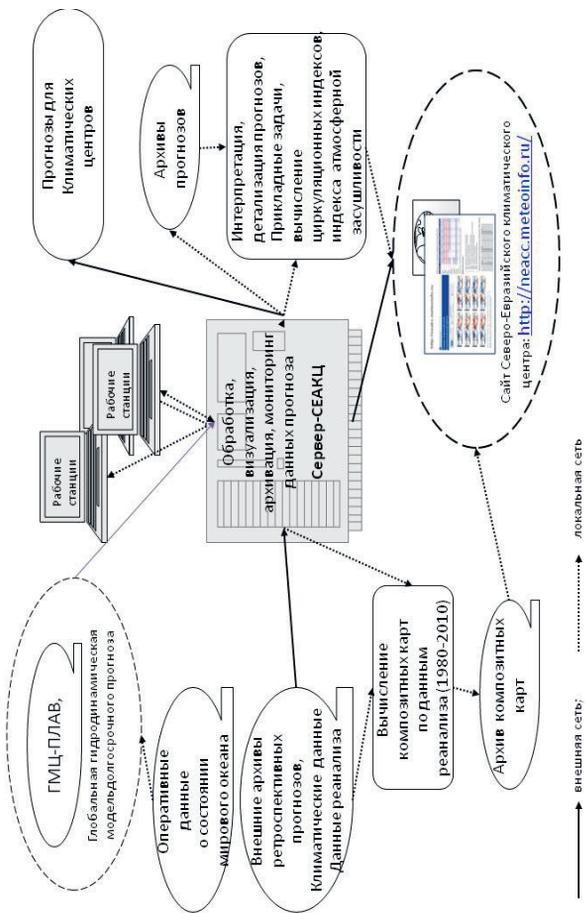
В Гидрометцентре России технология выпуска глобальных ансамблевых прогнозов с заблаговременностью до 4 месяцев осуществляется на базе использования вычислительно эффективной полулагранжевой глобальной конечно-разностной модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ [10]. Ведется постоянная работа по созданию новых версий данной модели. В частности, улучшены блоки по параметризации коротко- и длинноволновой радиации, облачности, пограничного слоя, описания льда, озонового слоя.

С 2010 года на специально выделенном сервере (сервер ГМЦ) в операционной среде UNIX ведется пост-обработка ансамблей численных долгосрочных прогнозов метеорологических полей. Итоговой продукцией пост-обработки являются вероятностные прогнозы метеорологических полей на месяц и сезон (рис. 1).

Вычислительное ядро схемы вероятностного гидродинамического прогноза метеорологических условий в настоящее время составляет глобальная гидродинамическая модель общей циркуляции атмосферы ПЛАВ [11].

В конце каждого месяца, после обновления данных о температуре поверхности океана, рассчитываются 20 членов ансамбля прогностической системы ПЛАВ на многопроцессорной ЭВМ высокого быстродействия. Расчетные данные, прошедшие предварительную обработку, по локальной сети Гидрометцентра России передаются на сервер СЕАКЦ.

Комплекс программ построения вероятностного прогноза, написанный на языке FORTRAN и GrADS, управляется пакетом заданий. Первым заданием является настройка системы на работу с результатами прогноза в текущем месяце и с определенной заблаговременностью прогноза.



**Рис. 1. Функциональная блок-схема технологической линии глобального вероятностного прогноза на месяц и сезон СЕАКЦ.**

Следующие задания общего пакета управляют обработкой прогностических, климатических данных, данных ретроспективных прогнозов. В автоматическом режиме также осуществляется архивация, необходимая для работы прикладных задач, упаковка в код GRIB для передачи в климатические центры и визуализация выходных прогностических данных. Заданный набор полей по глобальной сети телесвязи пересылается в климатический центр АРСС, WMO LC LRF и ГГО. Полученные по глобальной сети прогностические данные модели ГГО используются для создания долгосрочного мультимодельного прогноза. На сайте Северо-Евразиатского климатического центра <http://neacc.meteoinfo.ru/> размещается вся информация о работе СЕАКЦ, результаты оперативной работы, научные и учебные материалы. Прогностическая страница сайта содержит карты композитных вероятностей распределения и аномалий приземной температуры, осадков, давления, температуры на высоте 850 гПа и геопотенциала на высоте поверхности 500 гПа на сезон с нулевой и месячной заблаговременностью для различных регионов земного шара (рис. 2), как отдельно по моделям ГМЦ и ГГО, так и совместно. Так же на сайте создан архив прогностических величин в цифровом виде, что позволяет использовать эту информацию в прикладных задачах.

В рамках основной технологической линии глобальных долгосрочных прогнозов метеорологических величин создана схема детализации прогнозов температуры воздуха на месяц и сезон с нулевой и месячной заблаговременностью для 70 станций СНГ (рис. 3).

Блок статистической интерпретации, реализованный в вычислительной среде сервера ГМЦ, включает процедуры, позволяющие получить по результатам расчетов глобальных полей приземной температуры воздуха на основе прогностических данных моделей ПЛАВ и ГГО значения температуры воздуха на станциях. В качестве основного метода обработки исходной информации используется метод билинейной интерполяции. Результатами являются прогностические значения температуры воздуха для 70 станций, расположенных на территории СНГ [6], полученные отдельно для трех месяцев сезона и всего сезона в целом с нулевой заблаговременностью, а также для первого месяца и сезона с месячной заблаговременностью.

Прогнозы по модели Гидроцентра России (ГМЦ) и  
 Главной Геофизической Обсерватории им. Воейкова (ГГО)

Глобально-статистический вероятностный прогноз для Евразии:  
 Еврота, Северная Азия, Евразия, Россия, Азия, Глобус  
 Прогностические центры:  
 Гидроцентр России (ГМЦ), Главная Геофизическая Обсерватория им. Воейкова (ГГО)

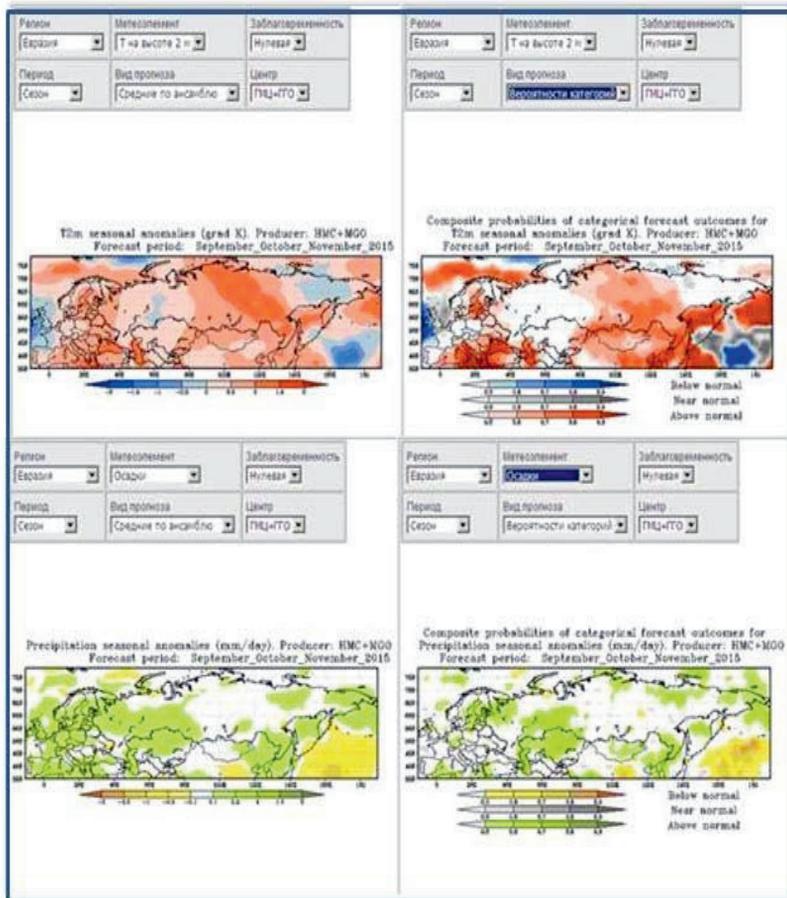


Рис. 2. Прогностические карты пространственного распределения аномалий приземной температуры воздуха и осадков, стратифицированных по трем основным градациям (ниже нормы, норма и выше нормы) нулевой заблаговременности на сезон. Представлены результаты моделей ГМЦ, ГГО и совместные результаты.



**Рис. 3. Функциональная блок-схема детализации глобальных долгосрочных прогнозов.**

В технологическую схему включен блок вычисления восьми индексов атмосферной циркуляции [2, 3], таких как EA – Восточно-атлантическое колебание, WA – Западно-атлантическое колебание, EU – Евразийское колебание, WP – Западно-тихоокеанское колебание, PNA – Тихоокеанское-северо-американское колебание, NAO – Североатлантическое колебание, POL – Полярное колебание, AOS – Арктическая осцилляция (рис. 4).

## **2. Верификация сезонных прогнозов**

Для верификации вероятностного и детерминистского прогнозов на сезон в оперативном режиме необходимо использовать качественные фактические данные, представленные в том же виде, что и прогностическая информация. Кроме того, оценка качества должна быть получена в краткие сроки после окончания прогностического периода.

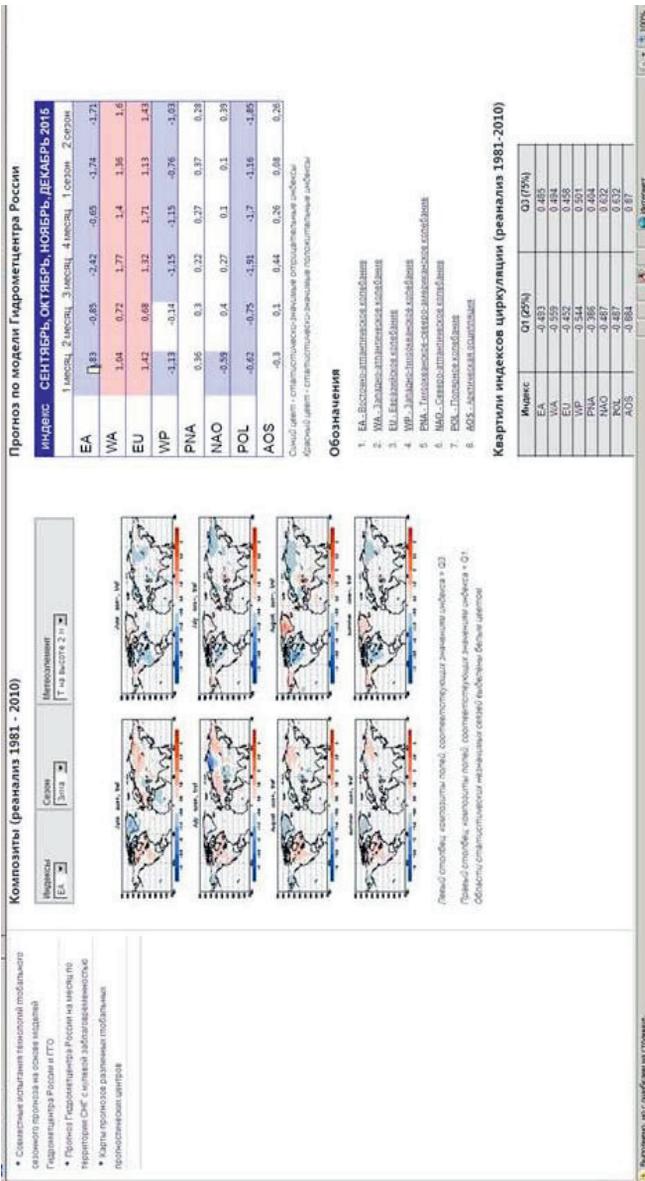


Рис. 4. Представление на сайте СЕАКЦ информации об индексах атмосферной циркуляции.

С учетом соотношения оперативности и качества информации для оперативной оценки оправдываемости прогнозов используется реанализ NOAA NCEP-DOE Reanalysis-2 (средние месячные поля давления воздуха, приведенного к уровню моря, температуры воздуха на изобарических поверхностях, геопотенциала на изобарических поверхностях, приземной температуры воздуха). Кроме того, копируются месячные суммы осадков (CAMS\_OPI).

Верификационные оценки для всех пяти переменных записываются в файл, который помещается на сайт СЕАКЦ. В интерактивном режиме выбираются год и месяц начала прогноза и прогнозируемая величина, после чего в окне отображаются карты фактических и прогностических аномалий, карта прогноза в вероятностной форме, а также таблица показателей оправдываемости. Регион, по которому приводятся показатели, можно выбрать отдельно.

Количественные оценки качества прогнозов, составленных с использованием гидродинамической модели ПЛАВ, строятся с учетом рекомендаций ВМО [7], а также накопленного опыта по составлению долгосрочных прогнозов в Гидрометцентре России. В качестве основных оценок детерминистических прогнозов используются следующие показатели:

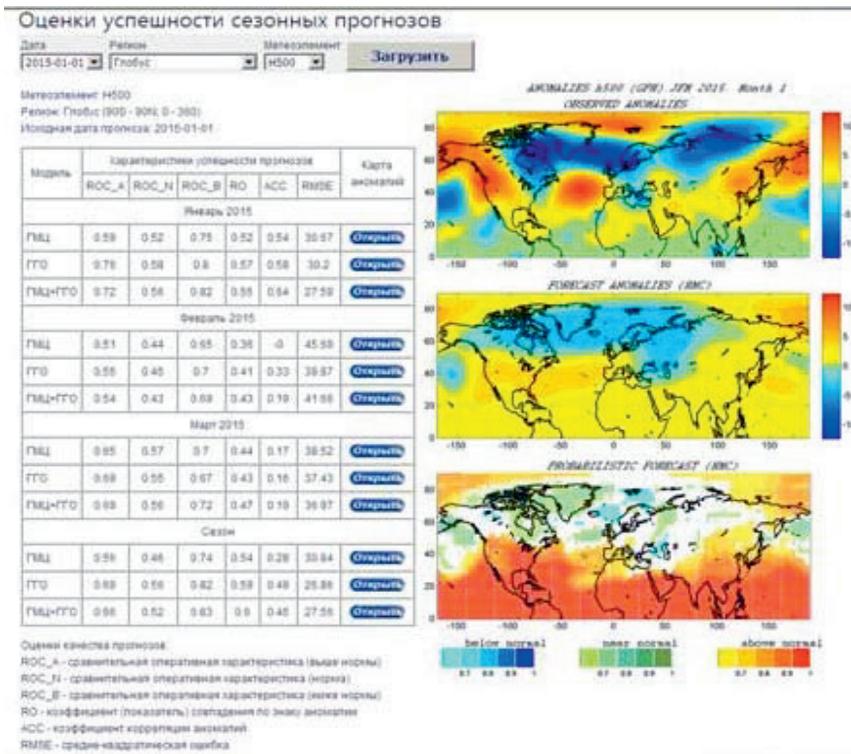
- коэффициент (показатель) совпадения по знаку аномалии  $\rho$ ;
- коэффициент корреляции аномалий AC;
- относительная ошибка прогноза Q;
- средний квадрат ошибки прогноза (mean squared error) MSE;
- критерий качества по среднему квадрату ошибки – мера мастерства по отношению к климатическому прогнозу (mean squared error skill score) MSSS.

Оценка качества вероятностных прогнозов выполнялась с использованием Сравнительной оперативной характеристики (ROC). Для построения кривой ROC полный диапазон прогнозируемых вероятностей разбивался на 10 градаций и строилась таблица сопряженности, в которой каждой градации прогноза события ставится в соответствие число произошедших и не произошедших прогнозируемых событий.

Площадь под кривой (показатель ROC) – это обобщенная характеристика качества прогнозов. Показатель ROC, равный

единице, соответствует идеальному прогнозу. Показатель ROC, равный 0,5 и меньше, свидетельствует о том, что прогноз невалифицированный.

На рис. 5 приведены карты и таблицы оценок качества прогноза на январь–март 2015 года.



**Рис. 5. Карты и таблицы оценок качества прогноза на январь–март 2015 г.**

Оценки качества прогнозов:

ROC\_A – сравнительная оперативная характеристика (выше нормы);

ROC\_N – сравнительная оперативная характеристика (норма);

ROC\_B – сравнительная оперативная характеристика (ниже нормы);

$\rho$  – коэффициент (показатель) совпадения по знаку аномалии;

ACC – коэффициент корреляции аномалий;

RMSE – среднеквадратическая ошибка.

В табл. 1–4 приведены средние оценки оперативных прогнозов за 2012–2014 гг. по модели ПЛАВ и мультимодельного прогноза с использованием в равных весах прогнозов Гидрометцентра России и ГГО (ГМЦ+ГГО). Видно, что оценки прогноза приземной температуры (особенно по знаку) достаточно высокие, хотя ниже, чем оценки официальных синоптико-статистических методов. Оценки прогноза осадков невысоки, но по глобусу они значимо положительные.

Как отмечалось во многих исследованиях, качество мультимодельных прогнозов обычно выше, чем качество каждого входящего в набор прогноза. В нашем случае также оценки прогноза ГМЦ+ГГО лучше, чем прогноза по отдельным моделям. Исключение составляет прогноз поля давления на сезон, а также оценки вероятности попадания прогностических величин в градацию «около нормы».

### **3. Верификационные оценки ретроспективных прогнозов**

Ретроспективные прогнозы модели ПЛАВ выполнены для 28 лет (1983–2010 гг.). Ведется постоянная работа по созданию новых версий данной модели. В настоящее время пространственное разрешение модели – 1,5 градуса по широте и долготе. В оперативной версии модели рассчитываются 20 реализаций прогноза. Прогнозы на историческом материале представлены в виде ансамблей из 10 глобальных полей. Для оценки используются поля с шагом сетки 2,5 градуса по широте и долготе.

На первом этапе рассчитаны средние многолетние поля за период 1983–2010 гг. и получены данные фактического и модельного климата. Модельный климат рассчитывался отдельно для каждого ряда четырехмесячных прогнозов. В целом фактический и модельный климат имеют удовлетворительную согласованность.

Таблица 1

## Оценки оперативных прогнозов по модели ПЛАВ на первый прогностический месяц

	h500		mslp		t850		t2m		prec	
	Globus	N.Eurasia								
ACC	0,31	0,25	0,27	0,23	0,30	0,35	0,28	0,31	0,08	0,09
$\rho$	0,30	0,17	0,18	0,14	0,24	0,24	0,30	0,24	0,07	0,01
RMSE	36,07	49,40	2,96	3,54	1,40	1,95	1,48	2,32	1,26	0,61
ROC_B	0,64	0,58	0,61	0,60	0,57	0,60	0,65	0,61	0,54	0,54
ROC_N	0,52	0,50	0,51	0,52	0,51	0,52	0,55	0,53	0,50	0,51
ROC_A	0,56	0,56	0,63	0,59	0,54	0,60	0,62	0,60	0,53	0,54

Таблица 2

## Оценки оперативных прогнозов по модели ПЛАВ на сезон (средние поля за три месяца)

	h500		mslp		t850		t2m		prec	
	Globus	N.Eurasia								
ACC	0,28	0,23	0,16	0,14	0,24	0,30	0,25	0,23	0,05	0,11
$\rho$	0,36	0,16	0,18	0,13	0,23	0,25	0,28	0,20	0,04	0,03
RMSE	24,87	33,00	2,10	2,32	1,38	1,65	1,13	1,71	1,20	0,56
ROC_B	0,64	0,54	0,60	0,58	0,55	0,56	0,63	0,58	0,52	0,53
ROC_N	0,52	0,49	0,52	0,51	0,52	0,52	0,54	0,52	0,50	0,50
ROC_A	0,58	0,51	0,63	0,56	0,52	0,58	0,59	0,59	0,51	0,52

Таблица 3

## Оценки оперативных прогнозов по модели ГМЦ+ГГО на первый прогностический месяц

	h500		mslp		t850		t2m		prec	
	Globus	N.Eurasia								
ACC	0,38	0,38	0,31	0,31	0,39	0,44	0,37	0,40	0,14	0,11
$\rho$	0,34	0,27	0,25	0,20	0,28	0,31	0,35	0,29	0,08	0,01
RMSE	33,50	44,78	2,79	3,21	1,28	1,82	1,36	2,13	1,26	0,61
ROC_B	0,69	0,65	0,66	0,64	0,61	0,66	0,69	0,66	0,56	0,54
ROC_N	0,55	0,52	0,53	0,53	0,53	0,54	0,57	0,55	0,51	0,51
ROC_A	0,66	0,64	0,67	0,62	0,60	0,66	0,68	0,66	0,55	0,53

Таблица 4

## Оценки оперативных прогнозов по модели ГМЦ+ГГО на сезон

	h500		mslp		t850		t2m		prec	
	Globus	N.Eurasia								
ACC	0,30	0,29	0,17	0,12	0,31	0,40	0,33	0,32	0,10	0,13
$\rho$	0,35	0,19	0,21	0,12	0,25	0,29	0,32	0,25	0,05	0,04
RMSE	23,93	31,37	2,01	2,21	1,30	1,60	1,07	1,63	1,20	0,56
ROC_B	0,66	0,57	0,62	0,59	0,58	0,61	0,66	0,61	0,53	0,54
ROC_N	0,53	0,50	0,52	0,50	0,53	0,51	0,55	0,52	0,50	0,50
ROC_A	0,62	0,54	0,64	0,56	0,58	0,60	0,64	0,62	0,53	0,53

При этом интенсивность очагов повышенного и пониженного температурного фона имеет видимые отличия. Аналогичные результаты получены для всех прогностических сезонов и для всех метеорологических полей. В климатических модельных полях осадков отмечаются некоторые пространственные сдвиги районов с высокими суммами осадков относительно фактического климата. Подобные смещения характерны для большинства прогностических полей, в связи с чем необходима процедура даунскейлинга (пространственной детализации сезонных прогнозов).

Рассчитаны коэффициенты линейного тренда за 1983–2010 гг. фактических и модельных рядов в каждом узле сетки и осредненные по различным районам. В целом поля фактических и прогностических тенденций соответствуют друг другу.

Как было показано в [14], распределение членов ансамбля в сезонном прогнозе большинства прогнозируемых метеорологических величин, в частности атмосферного давления, статистически незначимо отличается от гауссова. Поэтому для расчетов использовались аномалии средних значений и дисперсии прогностических ансамблей в узлах сетки, вычисляемые в ходе предварительной обработки.

Верификация проводилась для сеточных значений прогноза и для прогнозов, интерполированных в точки с координатами метеорологических станций.

Был создан блок статистической интерпретации, позволяющий получить по результатам расчетов глобальных полей приземной температуры воздуха на основе модели ПЛАВ значения температуры воздуха на станциях. В качестве основного метода обработки исходной информации используется метод билинейной интерполяции. Результатами являются прогностические значения температуры воздуха для 70 станций, расположенных на территории СНГ, полученные отдельно для трех месяцев сезона и всего сезона в целом с нулевой заблаговременностью, а также для первого месяца и сезона с месячной заблаговременностью.

Верификация качества прогнозов температуры воздуха на станциях, а также температуры и осадков в виде сеточных полей проводится согласно рекомендациям ВМО (см. предыдущий раздел).

Для оценки вероятностных прогнозов применялся также показатель мастерства вероятностных прогнозов осуществления событий в ранжированных категориях (RPSS). Детальное описание этого метода приводится в [16].

RPSS изменяется в диапазоне от минус бесконечности до единицы, причем RPSS идеальных прогнозов равен единице. Положительные значения RPSS говорят о превосходстве тестируемого метода, отрицательные – о превосходстве референтного прогноза, в нашем случае – климатического прогноза.

Для оценки статистической значимости полученных оценок применялся метод Монте–Карло в версии, предложенной в [4]. Случайным образом генерировались 25-летние последовательности вероятностей, дающих единицу в сумме по трем градациям. По этим последовательностям рассчитывались случайные значения оценок. Было генерировано 1000 последовательностей и, соответственно, получено 1000 случайных значений. Уровень значимости (односторонний) определялся как доля случайно полученных значений оценок, превышающих или равных значению оценок, полученному на оригинальных прогнозах. Например, одностороннему уровню значимости 2,5 % соответствует 25 превышений в 1000 тестов.

Верификация прогнозов проводилась с применением кроссвалидации. Этот метод рекомендован ВМО [9] как метод, обеспечивающий наибольшую независимость данных при коротких рядах. Суть метода заключается в том, что из многолетнего ряда прогнозов последовательно исключается год прогноза и несколько последующих лет, а оставшаяся часть ряда используется как обучающая выборка – по ней рассчитывается среднее многолетнее значение, по ней рассчитываются аномалии наблюдений и прогнозов, разрабатывается уравнение регрессии и т.д. Цель кроссвалидации – имитация оценки прогноза на независимой выборке.

Рассчитаны показатели ROC прогнозируемых величин для различных регионов. В табл. 5 приведены показатели ROC для ретроспективных прогнозов на декабрь – март.

В целом, прогнозы температуры воздуха наиболее успешны в тропиках, категории «выше нормы» и «ниже нормы» с достаточной степенью уверенности прогнозируются над Северной Атлантикой, а при прогнозе на первый-второй месяц – в ряде регионов

Северной Евразии. Категория «около нормы» прогнозируется менее успешно. Прогнозы осадков имеют наилучшие оценки в приэкваториальных районах.

Таблица 5

**Показатели ROC для ретроспективных прогнозов приземной температуры воздуха на декабрь – март**

<b>Регион</b>	<b>Месяц / сезон</b>	<b>Выше нормы</b>	<b>Около нормы</b>	<b>Ниже нормы</b>
Северная Евразия	12	0,743	0,601	0,738
	1	0,528	0,510	0,536
	2	0,530	0,502	0,533
	3	0,530	0,497	0,535
	12–2	0,621	0,521	0,622
	1–3	0,531	0,503	0,541
Европейская территория России	1	0,715	0,566	0,719
	2	0,574	0,507	0,573
	3	0,570	0,509	0,560
	4	0,555	0,502	0,553
	5	0,662	0,534	0,656
	6	0,588	0,509	0,587
Сибирь	1	0,778	0,646	0,771
	2	0,524	0,509	0,537
	3	0,518	0,494	0,534
	4	0,518	0,492	0,534
	5	0,626	0,510	0,624
	6	0,513	0,493	0,532
Дальний Восток	1	0,728	0,579	0,713
	2	0,492	0,511	0,499
	3	0,506	0,505	0,505
	4	0,515	0,499	0,514
	5	0,576	0,522	0,582
	6	0,499	0,508	0,505
Кавказ	1	0,663	0,542	0,691
	2	0,569	0,499	0,571
	3	0,533	0,502	0,532
	4	0,555	0,517	0,545
	5	0,617	0,521	0,620
	6	0,565	0,505	0,587

Казахстан	1	0,682	0,556	0,732
	2	0,575	0,538	0,588
	3	0,591	0,519	0,593
	4	0,525	0,494	0,567
	5	0,667	0,524	0,653
	6	0,591	0,522	0,624
Средняя Азия	1	0,639	0,556	0,648
	2	0,567	0,485	0,579
	3	0,498	0,491	0,459
	4	0,500	0,513	0,446
	5	0,538	0,471	0,544
	6	0,567	0,494	0,544

Были разработаны и протестированы методы даунскейлинга. Используется скользящее окно (от 500×500 до 1000×1000 км) и осреднение результатов регрессий. Выбирается окно с наибольшей суммой модулей коэффициентов корреляции между наблюдениями на станции и ретроспективными модельными прогнозами в точках внутри окна; из каждой точки рассчитывается прогноз на станцию с помощью регрессии; все прогнозы осредняются. Также используется метод со скользящим окном и проекцией, когда рассчитывается многолетняя серия предиктора с помощью проекции ретроспективных модельных прогнозов (аномалий) на поле корреляций с весовыми коэффициентами равными корреляциям внутри окна и равными нулю вне окна; прогноз рассчитывается с помощью регрессии серии наблюдений на станции на серию предиктора. Третий вариант – все точки с корреляцией, превышающей пороговое значение, и осреднение результатов регрессий: отбираются все точки модельных прогнозов с корреляцией, превышающей пороговое значение, далее – как в первом методе.

Каждый из методов включал множество вариаций:

- состав потенциальных предикторов (T, SLP, Z500 и др.);
- размеры скользящего окна и поля модельного прогноза;
- критерии отбора (пороговые уровни корреляции).

Тестирования проводилось с использованием в качестве критерия оценки меры мастерства RPSS. Показано, что качество ретроспективных прогнозов на станциях с использованием даунскейлинга заметно выше, чем при интерполяции на станции из

модельного прогноза в узлах сетки. При использовании даунскей-линга значения  $RPSS > 0,6$ , значимые на 2,5 % уровне в одностороннем тесте, получены для 60–70 % станций, а при интерполяции – для 20–40 % станций.

#### **4. Долгосрочные прогнозы с недельной детализацией**

За основу технологической линии долгосрочных прогнозов с недельной детализацией была взята технологическая линия сезонных прогнозов. Это обусловлено тем, что ядром технологии в обоих случаях является модель ПЛАВ со среднесуточной дискретностью записи прогностической информации.

Перечислим основные отличия технологической линии с недельной детализацией от технологической линии сезонных прогнозов:

1. Расчет ретроспективных и оперативных прогнозов от одной даты со среднесуточной дискретностью сохранения прогностических данных (ЭВМ TORNADO) на 45 суток.

2. Блок выбора заданных элементов прогностической модели и усреднения по заданным временным интервалам прогностических и ретроспективных ансамблей прогнозов (ЭВМ TORNADO).

3. Мониторинг качества и верификация оперативных прогнозов в режиме ON-LINE.

Мониторинг качества прогнозов с недельной дискретизацией в реальном времени осуществляется в формате единой технологической линии еженедельных выпусков глобальных долгосрочных метеорологических прогнозов, развернутой и отлаженной на специализированном сервере в Гидрометцентре России, по мере поступления фактических данных с отставанием примерно в один месяц.

В список верифицируемой прогностической продукции входят глобальные поля (на сетке с пространственным разрешением  $2,5 \times 2,5$  градуса широты и долготы):

- геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа;
- температуры воздуха на уровне поверхности 850 гПа;
- атмосферного давления на уровне моря;
- приземной температуры воздуха;

- суммарных осадков;
- станционные данные (70 станций на территории СНГ) по температуре и осадкам.

На сервере размещены также архивы модельного и фактического климата; здесь же хранятся прогностические и фактические данные. Климатические архивы основных метеорологических полей в суточной дискретности созданы на базе архива реанализа (Reanalysis – II) за период 1981–2010 гг. В качестве основного массива для станционных данных используется архив средних суточных значений температуры воздуха и осадков ВНИИГМИ-МЦД [6] для 70 станций, расположенных на территории СНГ. Архив регулярно пополняется станционными данными базы МАКТ Гидрометцентра России. Проведено сравнение климатических полей с данными станционных наблюдений. В рамках технологической линии разработаны и реализованы также программные средства пополнения баз фактических и прогностических данных, необходимых для оперативного или квазиоперативного функционирования схемы долгосрочного прогноза метеорологических условий с недельной дискретизацией.

Количественные оценки качества прогнозов, составленных с использованием гидродинамических моделей Гидрометцентра России (НМС) и ГГО (МГО), строятся с учетом рекомендаций ВМО [7, 9], а также накопленного опыта по составлению долгосрочных прогнозов в Гидрометцентре России.

### **Заключение**

С использованием глобальной конечно-разностной модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ реализована технология ежемесячного ансамблевого прогноза на 3–4 месяца (в которой расширен состав прогнозируемых переменных и число членов прогностического ансамбля), а также технология еженедельного выпуска ансамблевого прогноза на срок до 1,5 месяцев, детализированного по времени и пространству для территории СНГ. Выполняются обязательства по участию Гидрометцентра России в международном проекте APCN. Проводятся совместные испытания прогностических технологий Гидрометцентра России» и ГГО в

режиме оперативных прогнозов с недельной дискретизацией на срок до 1,5 месяцев.

Результаты региональных оценок успешности прогнозов на месячных и сезонных временных масштабах, выполненные для территории СНГ и Северо-Евразийского региона, показывают, что качество вероятностных прогнозы на месяц и сезон с нулевой заблаговременностью выше климатического, но сильно варьирует в зависимости от сезона и региона. В связи с этим особое значение в плане практического использования этих прогнозов и выработки формы принятия решений приобретает взаимодействие с потенциальными потребителями.

В настоящее время долгосрочные метеорологические прогнозы носят экспериментальный характер, а их качество не удовлетворяет в полной мере практические потребности. Предполагается повысить качество прогнозов, главным образом за счет усовершенствования гидродинамической модели ПЛАВ, а также проведения исследований источников потенциальной предсказуемости эволюции атмосферы на временных масштабах до сезона (таких как явление Эль-Ниньо, Арктическое и Североатлантическое колебания и др.). Для сезонного прогноза планируется переход от атмосферной модели к совместной модели атмосферы и океана Гидрометцентра России и ИВМ РАН.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-37-0053) в Гидрометцентре России.

### **Список использованных источников**

1. Бундель А.Ю., Вильфанд Р.М., Крыжов В.Н., Тищенко В.А., Хан В.М. Оценка мультимодульного вероятностного прогноза на сезон на основе данных моделей АРСС // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 3. – С. 5–19.

2. Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Часть II. Их влияние на пространственное распределение температуры и осадков на территории Северной Евразии // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 4. – С. 5–14.

3. Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Часть I. Статистический анализ и гидродинамическое моделирование // *Метеорология и гидрология*. – 2015. – № 3. – С. 5–22.

4. Киктев Д.Б., Крыжов В.Н. О сравнении различных методов оценки статистической значимости линейных трендов // *Метеорология и гидрология*. – 2004. – № 11. – С. 27–38.

5. Крыжов В.Н. Постпроцессинг модельных долгосрочных прогнозов в Североевразийском климатическом центре // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада, лтд, 2010. – С. 247–253.

6. Массив данных суточной температуры воздуха по 120 станциям на территории СНГ за период с 1963 по 2005 г. – ВНИИГМИ-МЦД (Версия массива 6.01, февраль 2007 г., ID RUS-6.01.01-01-26/02/2007).

7. Муравьев А.В. Стандартизированная система верификации долгосрочных метеорологических прогнозов. (SVS LRF) // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада, лтд, 2010. – С. 264–288. – [http://method.hydromet.ru/publ/books/80\\_years/murav.pdf](http://method.hydromet.ru/publ/books/80_years/murav.pdf)

8. Муравьев А.В., Казначеева В.Д., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Долгосрочное прогнозирование аномальных синоптических ситуаций. Основные конструктивные и технические характеристики динамикостатистической схемы долгосрочного прогноза погоды // *Метеорология и гидрология*. – 1999. – № 3. – С. 28–36.

9. *Наставление* по глобальной системе обработки данных и прогнозирования. Том I. (Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО). Глобальные аспекты. Издание 1992 г. ВМО-№ 485. Добавление II.8. Стандартная система проверки оправдываемости (ССПО) долгосрочных прогнозов (ДП). – Секретариат ВМО, Женева, Швейцария, 2005. – 173 с.

10. Толстых М.А. Полулагранжева модель атмосферы с высоким разрешением для численного прогноза погоды // *Метеорология и гидрология*. – 2001. – № 4. – С. 5–16.

11. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. – Обнинск: ФАО ФОП, 2010. – 111 с.

12. Хан В.М., Вильфанд П.М., Бундель А.Ю., Крыжов В.Н., Мин Е.-М., Тищенко В.А. Мультимодельный подход при составлении прогнозов погоды на сезон // *Метеорология и гидрология*. – 2011. – № 1. – С. 19–29.

13. Graham R.J., Evans A.D., Mylne K., Harrison M.S., Robertson K.B. An assessment of seasonal predictability using general circulation models // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*. – 2010. – Vol. 126 (567). – P. 2211–2240. – doi: 10.1002/qj.49712656712.

14. Kryjov V.N., Kang H.-W., Nohara D., Song B.-G., Lee D.-Y., An K.-H., Sohn S.-J., Min Y.-M., Saji N.H., Tam C.Y.F. Assessment of the Climate Forecasts Produced by Individual Models and MME Methods // APCC Technical Report. – 2006. – Vol. 1, No. 1. – 534 p.

15. Palmer T.N. *et al.* Development of a European multi-model ensemble system for seasonal to inter-annual prediction (DEMETER) // Bull. Amer. Met. Soc. – 2004. – Vol. 85. – P. 853–872.

16. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. – M.: Academic Press, 1995. – 467 p.

*Поступила в редакцию 01.10.2015 г.*