

А.М. Девяткин, Н.О. Моисеева, В.А. Ременсон, Е.А. Румянцева

АДАПТИВНЫЙ МЕТОД МНОГОМОДЕЛЬНОГО КРАТКОСРОЧНОГО И СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

A.M. Deviatkin, N.O. Moiseeva, V.A. Remenson, E.A. Rumiantceva

ADAPTIVE METHOD OF THE MULTIMODEL SHORT-TERM AND MEDIUM-RANGE WEATHER FORECAST

Описан метод среднесрочного прогнозирования метеорологических полей на основе комплексирования выходной продукции ведущих метеорологических центров Глобальной системы обработки данных и прогнозирования. Метод позволяет существенно повысить успешность разрабатываемых среднесрочных прогнозов барических полей и увеличить предел их предсказуемости.

Ключевые слова: гидродинамические модели атмосферы, среднесрочный прогноз метеорологических полей, комплексирование методов прогнозирования, многомодельный метод прогнозирования

In this paper, an Adaptive Method of the Multimodel Medium-range Weather Forecast, based on the integration of output products of World Meteorological Centers of the Global Data-processing and Forecasting System, is described. This method provides to advance the skill of medium-range baric fields forecasts and to increase the limit of theirs predictability.

Key words: hydrodynamic models for atmospheric, a medium-range weather forecast, an integration of forecasting methods, a multimodel forecasting method.

Информационной базой современных технологий разработки среднесрочных прогнозов метеорологических полей являются глобальные системы наблюдений и автоматизированные технологии сбора и обработки гидрометеорологической информации (ГМИ), которые являются элементами Глобальной системы обработки данных и прогнозирования (ГСОДП) Всемирной Метеорологической Организации. Решение задач разработки среднесрочных прогнозов метеорологических полей осуществляется в Мировых, Региональных специализированных и Национальных метеорологических центрах ГСОДП на основе гидродинамических моделей атмосферы (ГДМА) и автоматизированных технологических комплексов численного прогнозирования погоды. От качества прогнозирования метеорологических полей в значительной степени зависит успешность прогнозов элементов погоды, разрабатываемых в системах

физико-статистической и синоптической интерпретации выходной продукции ГДМА. Особое значение предлагаемый метод имеет на фоне наметившихся изменений климата, отмечаемых рядом авторов [3].

В настоящее время глобальные ГДМА обеспечивают получение удовлетворительных результатов при среднесрочном прогнозировании крупномасштабных метеорологических полей у поверхности земли на сроки до 3–5 суток, а на тропосферных уровнях и в нижней стратосфере — до 5–7 суток [6, 7]. Численные эксперименты показывают, что потенциально возможно увеличение заблаговременности прогнозов метеорологических полей до 8–10 суток. Однако успешность разрабатываемых прогнозов даже на основе современных ГДМА значительно ухудшается уже на 6–7 сутки вследствие накапливающихся со временем ошибок интегрирования гидродинамических уравнений.

Одним из перспективных направлений увеличения предела предсказуемости гидродинамических моделей атмосферы и повышения успешности прогнозов метеорологических полей может стать метод комплексирования выходной прогностической продукции ведущих метеорологических центров ГСОДП.

Качество ГДМА, используемых разными метеоцентрами, зависит от учета ряда факторов, которые ранжируются по степени их важности в следующей последовательности [4]: точность начальных данных, горизонтальное разрешение модели, параметризация конвекции, учет процессов в планетарном пограничном слое, вертикальное разрешение, инициализация начального состояния, точность данных о температуре воды в океанах, вертикальная диффузия тепла и влаги, суточный ход параметров атмосферы и подстилающей поверхности, модельные представления облачности и гидрологического режима материков, процессы подсеточного масштаба.

Современные системы численного прогнозирования полей метеорологических величин и явлений погоды состоят из шести подсистем [1]: наблюдательной, телекоммуникационной, вычислительной, усвоения данных, моделирования процессов в атмосфере, почве и океане, постпроцессинга (представления численных результатов моделей в форме, удобной для потребителя). Вполне естественно, что в различных прогностических центрах имеются некоторые отличия в содержательной части каждой из подсистем численного прогнозирования, что должно находить отражение в показателях успешности разрабатываемых прогнозов полей метеорологических величин.

Начало работ по комплексированию вероятностных и гидродинамических методов прогнозирования было положено в 70-е гг. прошлого века в трудах А.Н. Багрова, Ю.Н. Волконского, А.С. Дегтярева, Ф. Томпсона и других авторов [5]. В настоящее время на новой информационной основе методы комплексирования ГДМА для решения задач численного прогнозирования погоды разрабатываются в Гидрометцентре России, ВКА имени А.Ф. Можайского, РГГМУ и в ряде других учреждений нашей страны, а также в некоторых зарубежных метеорологических центрах [5, 8].

Рассмотрим возможности комплексирования выходной продукции глобальных ГДМА ведущих метеорологических центров ГСОДП в технологии среднесрочного многомодельного прогнозирования барических полей, развиваемой сотрудниками ВКА имени А.Ф. Можайского. Первая версия адаптивного многомодельного метода среднесрочного прогнозирования метеорологических полей была разработана в академии в 2011 г. [5]. В основу предложенного метода прогнозирования положена

модель оценивания математических ожиданий метеорологических параметров в классе линейных функций для неравноточных прогнозов по каждой точке заданной сеточной области с использованием нескольких ГДМА.

Для оценки математических ожиданий прогностических значений метеорологических параметров в этой версии используется соотношение

$$\hat{M}_{\hat{x}} = \sum_{j=1}^n c_j \hat{x}_j, \quad (1)$$

где \hat{x}_j — прогнозируемое значение метеорологического параметра j -й ГДМА; c_j — весовой коэффициент j -го метода прогнозирования в составе выбранного комплекса моделей; n — число прогнозов в обучающей выборке, по которой оцениваются весовые коэффициенты.

Постановка задачи нахождения весовых коэффициентов для прогнозируемых значений \hat{x}_j в рамках линейной модели (1) сводится к следующему [2].

Пусть характеристики точности прогноза метеорологической величины от прогноза к прогнозу изменяются так, что полученное при j -м прогнозе значение метеорологической величины \hat{x}_j имеет дисперсию

$$\hat{D}_{\hat{x}_j} = \tilde{D}_j, \quad j=1,2,\dots,n, \quad (2)$$

а ее математическое ожидание по каждой точке сеточной области на некотором временном интервале остается постоянным, т.е.

$$M_{\hat{x}_j} = M_{\hat{x}} = \bar{x}. \quad (3)$$

В данном случае оценка математического ожидания $\hat{M}_{\hat{x}}$ прогнозируемой величины является функцией прогностической выборки вида

$$\hat{M}_{\hat{x}} = \tilde{M}_{\hat{x}}(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n). \quad (4)$$

В работах [2, 5] показано, что оценка математического ожидания $\hat{M}_{\hat{x}}$ будет отвечать требованиям несмещенности, эффективности и состоятельности при условии, что весовые коэффициенты c_j в модели (1) обратно пропорциональны дисперсиям величин \hat{x}_j , а сумма коэффициентов равна 1. Введем обозначение $\tilde{d}_j = 1/\tilde{D}_j$.

С учетом введенного обозначения соотношение для весовых коэффициентов прогностической модели (1) примет вид:

$$c_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^n d_i}. \quad (5)$$

Прогностическая модель (1) является основой адаптивного метода многомодельного прогнозирования метеорологических полей с использованием выходной продукции ведущих метеорологических центров ГСОДП.

В качестве предикторов в прогностической модели (1) используются оценки математических ожиданий прогностических значений метеорологических величин, полученные в каждом метеорологическом центре. Отбор этих центров осуществляется на основе обучающих выборок, формируемых в виде электронных архивов результатов анализов и прогнозов метеорологических полей в коде GRIB за исходные сроки 00 и 12 UTC. Процедура отбора прогностических центров предусматривает их ранжирование по минимуму осредненных по земному шару или Северному полушарию, значений дисперсий ошибок прогнозируемых метеорологических величин. По оценкам дисперсий рассчитываются весовые коэффициенты для параметров модели (1).

Рассчитанными весовыми коэффициентами можно пользоваться на ограниченном временном интервале в связи с тем, что дисперсии ошибок прогнозирования с использованием отдельных глобальных ГДМА по-разному изменяются в течение года и даже в пределах климатических сезонов. Эти различия объясняются, с одной стороны, особенностями учета физических процессов, происходящих в атмосфере, в поверхностном слое океана и суши, а с другой – непрерывным совершенствованием ГДМА в каждом из метеорологических центров. Поэтому должна осуществляться «подстройка» модели (1) посредством периодического изменения весовых коэффициентов. В рассматриваемой технологии среднесрочного прогнозирования барических полей выбрана процедура дискретной адаптации прогностической модели к текущим условиям разработки прогнозов посредством формирования скользящего интервала формирования обучающих выборок. Численные эксперименты показали, что близким к оптимальному при оценивании весовых коэффициентов, является скользящий интервал осреднения весовых коэффициентов, равный 30 суткам, предшествующим дате прогнозирования τ_0 , т.е. оценивание весовых коэффициентов осуществляется на интервале $[\tau_0 - 30, \tau_0 - 29, \dots, \tau_0 - 1]$.

Не менее важной задачей, помимо выбора интервала для оценивания весовых коэффициентов, является задача определения состава ведущих оперативно-прогностических центров, включаемых в многомодельный комплекс с учетом успешности разрабатываемых ими гидродинамических прогнозов, а также возможностей получения прогностической продукции через центры коммутации сообщений, Интернет и другие каналы связи ГСОДП.

По существу должна быть решена задача выбора предикторов, включаемых в правую часть прогностической модели (1). Для решения этой задачи был проведен анализ количества прогностических выборок, поступающих за сроки 00 и 12 UTC от ведущих прогностических центров ГСОДП. Оказалось, что через центры сбора прогностической продукции за каждый из основных сроков, разрабатываемых прогнозов качественная прогностическая информация может быть получена, как правило, от 5–6 метеорологических центров. В связи с этим в обучающую выборку имеется возможность включения от двух до пяти предварительных предикторов, представленных результатами прогнозирования метеорологических полей. Окончательное решение о количестве и составе предикторов может быть принято только на основе проведения численных экспериментов.

Рассмотрим возможности применения метода комплексирования на примере разработки гидродинамических прогнозов барических полей по Северному полушарию на сроки от 12 до 168 ч.

В перечень предварительных предикторов, используемых в методе многомодельного прогнозирования барических полей, включены результаты прогнозирования полей давления на уровне моря p_0 и геопотенциальных высот изобарической поверхности AT_{500} , полученные на основе глобальных схем прогноза, и передаваемые в коде GRIB от следующих метеорологических центров: Гидрометеорологического центра РФ (ГМЦ, г. Москва), Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF, г. Рединг, Великобритания), Метеорологической службы Соединенного королевства Великобритании (УКМО, г. Экзетер, ранее г. Брэкнелл), Регионального метеоцентра Немецкой службы погоды ФРГ (DWD, г. Оффенбах), Национального центра прогнозов окружающей среды США (NCER).

Весовые коэффициенты оценивались по данным численного прогнозирования за июнь и ноябрь месяцы 2007 г. Всего было использовано 60 сеансов разработанных индивидуальных и многомодельных гидродинамических прогнозов. Исходный срок прогнозирования — 12 UTC. Шаг сетки электронного архива составляет $1,25 \times 1,25^\circ$.

В табл. 1 приведены осредненные значения весовых коэффициентов для многомодельного прогнозирования приземного давления, полученные с использованием рассматриваемой статистической выборки для четырех ГДМА. Аналогичная таблица получена для прогнозирования высот изобарической поверхности AT_{500} . В табл. 2 и 3 приведены осредненные значения оценок коэффициентов корреляции между прогностическими и фактическими значениями метеорологических величин (результаты анализов метеорологических полей) для летнего и осеннего сезонов ($\hat{r}_{\hat{x}_\phi \hat{x}_n}^*$). Осреднение осуществлялось за период с июня по ноябрь 2007 г. Всего было использовано 183 сеанса разработки многомодельных прогнозов.

Таблица 1

Осредненные значения весовых коэффициентов для многомодельного прогнозирования приземного давления (p_0) по территории Северного полушария

Центр	Заблаговременность, ч			
	24	72	120	168*
ECMWF (Рединг)	0,29	0,34	0,32	0,54
УКМО (Брэкнелл)	0,28	0,28	0,29	—
DVD (Оффенбах)	0,25	0,21	0,23	0,46
ГМЦ (Москва)	0,18	0,17	0,16	—

Примечание. * прочерк «—» означает отсутствие данных.

Таблица 2

Осредненные значения оценок коэффициентов корреляции поля p_0 ($\hat{r}_{\hat{x}_\phi \hat{x}_n}^*$) для территории Северного полушария

Центр	Заблаговременность, ч			
	24	72	120	168
ECMWF (Рединг)	0,94	0,91	0,77	0,63
УКМО (Брэкнелл)	0,93	0,90	0,76	—
DVD (Оффенбах)	0,92	0,87	0,70	0,61
ГМЦ (Москва)	0,88	0,81	0,65	—
Многомодельный прогноз	0,95	0,94	0,83	0,72

Таблица 3

Осредненные значения оценок коэффициентов корреляции поля $H_{500}(\hat{r}_{H_{500q}, \hat{H}_{500q}})$
для территории Северного полушария

Центр	Заблаговременность, ч			
	24	72	120	168
ECMWF (Рединг)	0,97	0,95	0,83	0,78
UKMO (Брэкнелл)	0,96	0,93	0,79	—
DVD (Оффенбах)	0,95	0,92	0,79	0,76
ГМЦ (Москва)	0,90	0,85	0,74	—
Многомодельный прогноз	0,98	0,97	0,89	0,87

На рис. 1 и 2 приведены осредненные значения оценок средних квадратических ошибок прогнозирования параметров атмосферы для данной статистической выборки.

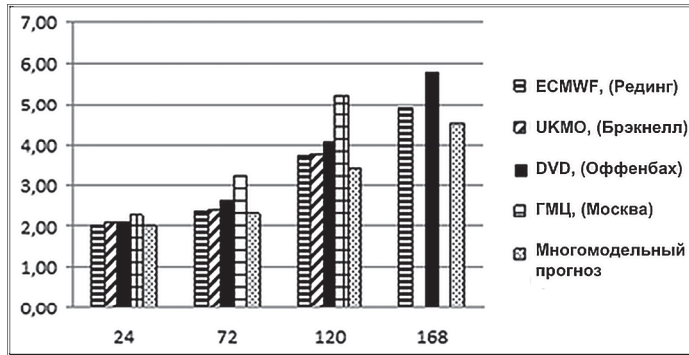


Рис. 1. Осредненные значения оценок средноквадратических ошибок индивидуальных и комплексных прогнозов поля атмосферного давления p_0 ($\hat{\sigma}_{p_0}^*$, гПа). Северное полушарие. По оси абсцисс: заблаговременность, час; по оси ординат: $\hat{\sigma}_{p_0}^*$, гПа

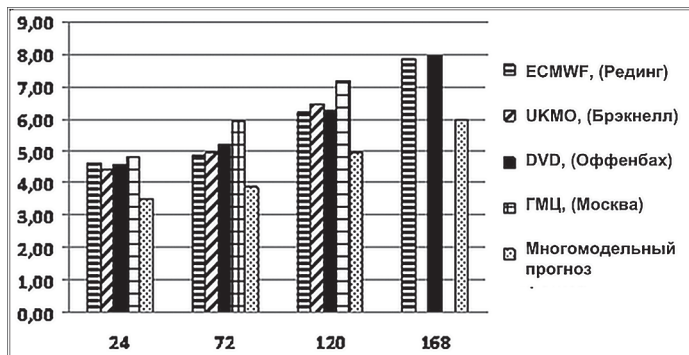


Рис. 2. Осредненные значения оценок средноквадратических ошибок индивидуальных и комплексных прогнозов полей высот изобарической поверхности AT_{500} ($\hat{\sigma}_{H_{500}}^*$, гп дам). Северное полушарие. По оси абсцисс: заблаговременность, час; по оси ординат: $\hat{\sigma}_{H_{500}}^*$, гп дам

Анализ табл. 2 и 3 и графиков, представленных на рис. 1 и 2, позволяет сделать следующие выводы относительно качества глобальных гидродинамических моделей атмосферы по данным выборки за 2007 г.:

- а) результаты успешности методов численного прогнозирования с заблаговременностью до 2 суток в большинстве метеоцентров приблизительно одинаковы;
- б) ошибки прогнозирования на 3–5 сутки возрастают по-разному, в связи с определенными различиями прогностических схем и технологиями их применения;
- в) различие в показателях успешности разрабатываемых прогнозов на основе индивидуальных ГДМА и многомодельного прогнозирования на третьи сутки составляет 2–4 % для лучших моделей (Рединг, Брэкнелл) и достигает 5–12 % на 5–7 сутки.

Обобщенная схема адаптивного метода среднесрочного многомодельного прогнозирования барических полей представлена на рис. 3.

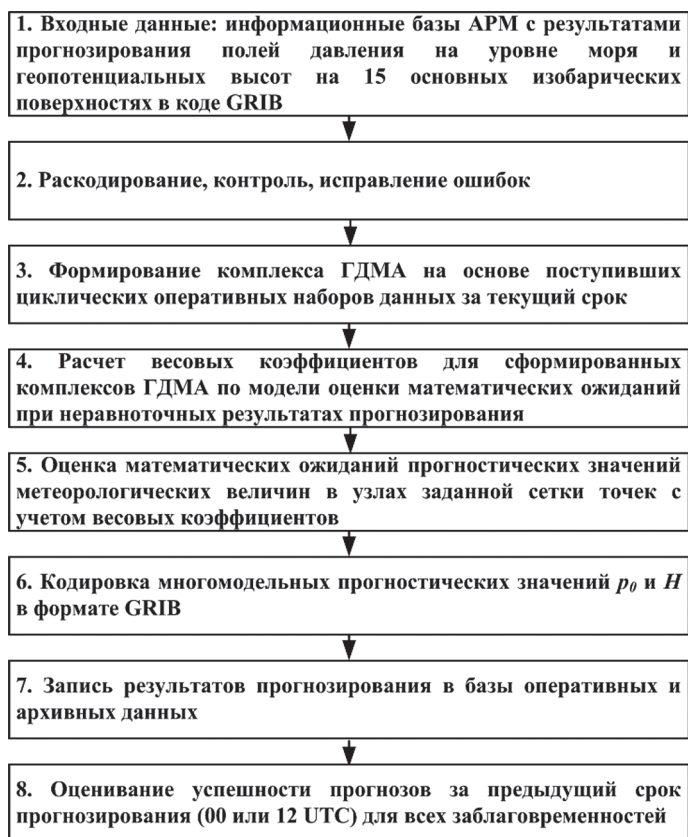


Рис. 3. Обобщенная схема адаптивного метода среднесрочного многомодельного прогнозирования барических полей

Практическая реализация метода возможна в любом оперативно-прогностическом центре, оснащённом программными комплексами центров коммутации сообщений и формирования баз данных с результатами анализов и прогнозов выходной продукции ведущих метеорологических центров ГСОДП. Требуется только незначительная доработка специального программного обеспечения автоматизированных рабочих мест типа «ГИС Метео Синоптик», «ГИС Метео Авиа», «ЛАССО», «АРМ-ВГМ» и некоторых других.

Литература

1. *Вильфанд Р.М., Васильев А.А., Шестакова Н.А.* Гидрометцентр России в XXI веке. // 80 лет Гидрометцентру России. — М.: «Триада ЛТД», 2010, с. 3–20.
2. *Городецкий В.И., Иоффе А.Я., Морозов Л.М., Петухов Г.Б., Сидоров В.Н., Юсупов Р.М.* Статистические методы в прикладной кибернетике. — М.: МО СССР, 1980, с. 96–98.
3. *Малинин В.Н., Шевчук О.И.* Об изменениях глобального климата в начале 21-го столетия. // Учёные записки РГГМУ, 2010, № 15, с. 150–154.
4. Методы среднесрочных прогнозов погоды. // Труды международного симпозиума. Москва, 6–11 декабря 1987 г. Под ред. Г.П. Курбаткина и П.П. Васильева. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 170 с.
5. *Моисеева Н.О.* Метод многомодельного среднесрочного прогнозирования полей метеорологических величин. // Труды института прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, 2011, вып. 90, с. 182–188.
6. *Розинкина И.А., Алферов Ю.В., Астахова Е.Д., Понамарева Т.Я., Цветков В.И.* Глобальная оперативная спектральная модель Гидрометцентра России: основные характеристики и особенности использования в технологиях кратко- и среднесрочного прогноза. // 80 лет Гидрометцентру России. — М.: «Триада ЛТД», 2010, с. 160–192.
7. *Толстых М.А., Богословский Н.Н., Юрова А.В.* Полулогранжева модель атмосферы ПЛАВ. // 80 лет Гидрометцентру России. — М.: «Триада ЛТД», 2010, с. 193–217.
8. *Newsha K. Ajami, Qingyun Duan, Xiaogang Gao, Soroosh Sorooshian* Multimodel Combination Techniques for Analysis of Hydrological Simulations: Application to Distributed Model Intercomparison Project Results. // Journal of Hydrometeorology, 2006, vol. 7, iss. 4, pp. 755–768.