

ОПЕРАТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАСЧЕТА ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОГНОЗОВ С ПОМОЩЬЮ ПОЛУЛАГРАНЖЕВОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ ПЛАВ

М.А. Толстых^{1,2}, Н.Н. Богословский^{2}, А.В. Шляева^{2,3}, В.Г. Мизяк²*

¹ *Институт вычислительной математики РАН,*

² *Гидрометеорологический научно-исследовательский
центр Российской Федерации*

** в настоящее время — Томский государственный университет,
механико-математический факультет*

³ *МГТУ им. Н.Э. Баумана
tolstykh@mecom.ru*

Введение

В 90-х гг. прошлого столетия многие прогностические центры выполнили работы по усовершенствованию своих глобальных оперативных моделей. Произошло массовое внедрение полулагранжевого метода для описания адвекции, который позволяет использовать в модели атмосферы шаг по времени в несколько раз больший, чем шаг, определяемый условием Куранта. Большинство прогностических центров к тому времени обладали параметризациями процессов подсеточного масштаба собственной разработки, поэтому в усовершенствованных моделях, как правило, заменялся лишь блок решения уравнений динамики атмосферы. В настоящее время подавляющее большинство глобальных гидродинамических моделей прогноза погоды основано на полулагранжевом подходе.

В Институте вычислительной математики РАН и Гидрометцентре России в 1997–2008 гг. была разработана и реализована вычислительно эффективная полулагранжева глобальная конечно-разностная модель

общей циркуляции атмосферы, получившая имя ПЛАВ (от ПолуЛагранжева, основанная на уравнении Абсолютного Вихря, в английском варианте — SL-AV). Особенности блока решения уравнений динамики атмосферы модели ПЛАВ являются применение конечных разностей четвертого порядка на несмещенной сетке для аппроксимации неадвективных слагаемых уравнений и использование вертикальной компоненты абсолютного вихря и дивергенции в качестве прогностических переменных.

В России к середине 90-х гг. ввиду отсутствия вычислительных и финансовых ресурсов отсутствовал современный для того времени набор параметризаций собственной разработки, апробированный оперативной практикой. Поэтому в модели ПЛАВ наряду с оригинальным блоком решения уравнений динамики атмосферы собственной разработки применяется набор параметризаций подсеточного масштаба, разработанный возглавляемым Францией консорциумом по мезомасштабному прогнозу погоды ALADIN/LACE [7].

Внедрение в качестве основного численного метода в начале 2010 г. глобальной модели ПЛАВ (решение Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам Росгидромета от 27.10.2009 г.) с разрешением 0,9 градуса по долготе, 0,72 градуса по широте и 28 уровнями по вертикали позволило примерно в два раза сократить отставание России, по сравнению с лидирующей группой мировых прогностических центров (<http://method.hydromet.ru>, раздел «Оценки прогнозов»), в ошибках прогноза таких важных параметров, как давление на уровне моря, температура на уровне 850 гПа и высота поверхности 500 гПа. Заметно уменьшились также ошибки прогноза приземной температуры.

В данной работе описывается оперативная технология расчета среднесрочных прогнозов по модели ПЛАВ, реализованная на параллельной вычислительной системе SGI Altix 4700.

1. Общее описание

Оперативная технология расчета глобальных среднесрочных прогнозов по модели ПЛАВ включает в себя следующие программные единицы:

- 1) блок подготовки начальных данных для модели (далее БПД);
- 2) параллельный программный комплекс модели ПЛАВ с интегрированным постпроцессингом;

3) средства записи прогностической продукции из выходных файлов модели в базы данных системы АСОИИ;

4) программа расчета оценок прогнозов;

5) сценарии (скрипты) управления сеансами на bash, запускаемые по cron.

Схематически оперативная технология представлена на рис. 1. Оперативная технология подготовки данных для расчета прогнозов представляет собой общепринятую схему, однако объективные анализы в свободной атмосфере на основе метода оптимальной интерполяции пока выполняются на основе внешнего первого приближения. В Гидрометцентре России ведутся работы по реализации трехмерного вариационного усвоения, однако пока результаты этой работы не внедрены в оперативную практику.

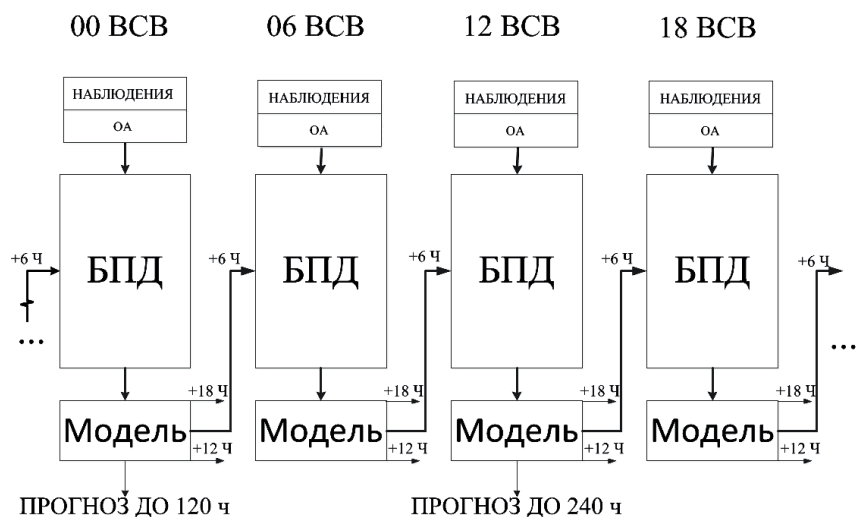


Рис. 1. Блок-схема оперативной технологии расчета прогнозов по модели ПЛАВ. БПД – блок подготовки начальных данных.

Для обеспечения надежности, диктуемой оперативным применением модели, модель ПЛАВ каждые 6 часов рассчитывает и сохраняет состояние атмосферы на модельных сигма-уровнях с

заблаговременностями 6, 12 и 18 ч. В штатном режиме используется только файл для заблаговременности +6 ч. В случае пропуска одного сеанса из-за сбоя вычислительной техники, например вследствие проблем электроснабжения, в следующий работающий сеанс автоматически поступает сохраненное состояние с заблаговременностью +12 ч из предыдущего отработавшего сеанса. Если из-за сбоя был пропущен не один, а два сеанса, то используется состояние +18 ч из соответствующего сеанса.

Блок подготовки данных модели подробно описан в следующем разделе. Полулагранжева модель атмосферы и ее программный комплекс подробно представлены в [3].

2. Блок подготовки данных

Блок подготовки начальных данных схематически представлен на рис. 2.

В начале его работы происходит считывание климатических полей на поверхности из архива, содержащего постоянные поля (например орография) и среднемесячные значения меняющихся полей (например лиственный индекс). Архив содержит климатические данные физиографических характеристик поверхности суши (орография, маска «суша–море», длина шероховатости, альbedo, излучательная способность, процент песка и глины, глубина деятельного слоя почвы, преобладающий тип растительности, альbedo, индекс лиственной активности, минимальное устьичное сопротивление), интерполированные на сетку модели $0,9^\circ \times 0,72^\circ$ по долготе и широте.

Орография и ее подсеточные характеристики рассчитывались на основе набора данных GTOPO30 с горизонтальным разрешением в 30 угловых минут. Остальные характеристики рассчитывались по спутниковым данным, обработанным и собранным в набор ECOCLIMAP [9] с горизонтальным разрешением 1 км для процентного содержания песка и глины в почве, 10 км – для остальных характеристик. Для получения текущих значений климатических полей выполняется линейная интерполяция по времени. Это обеспечивает гладкое изменение полей, имеющих сезонный ход.

Для подготовки начальных данных в блоке подготовки данных применяются:

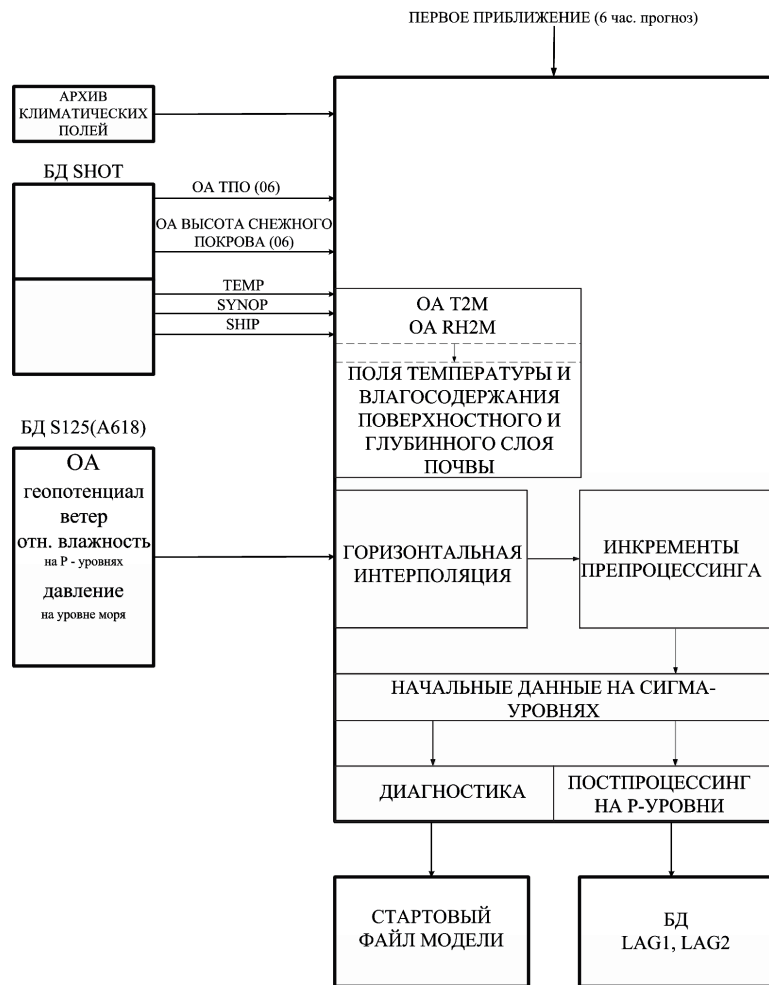


Рис. 2. Схема блока подготовки начальных данных для модели ПЛАВ.

- квазиусвоение для полей в свободной атмосфере;
- готовые объективные анализы (ОА) температуры поверхности океана и высоты снежного покрова (применяются ежедневно в срок 06 часов);

– объективные анализы температуры и влажности на уровне 2 м собственной разработки;

– схема коррекции полей температуры и влагосодержания поверхностного и глубинного слоев почвы.

В качестве входной информации для объективных анализов приземных температуры и относительной влажности используются стационарные данные SYNOP и SHIP: температура точки росы и температура (для каждой станции по ним определяется относительная влажность, которая и используется для анализа влажности на уровне 2 м), содержащиеся в базе данных SHOT системы АСООИ, и поле первого приближения, являющееся 6-часовым прогнозом модели ПЛАВ, стартовым с предыдущего цикла анализа.

Алгоритм разработанного объективного анализа относительной влажности основан на схеме оптимальной интерполяции и соответствует алгоритмам, применяемым в ECMWF и в модели HIRLAM [10].

По сравнению с применявшимся когда-то для модели ПЛАВ анализом СУД-ИОИ [4], используется большее количество наблюдений в каждом узле сетки (число станций ограничено пятьюдесятью, а не восемью). Для близко расположенных станций в реализованном алгоритме анализа генерируется так называемое «супернаблюдение», являющееся средним арифметическим наблюдений, находящихся друг от друга на расстоянии меньше заданного. Еще одним отличием от анализа СУД-ИОИ является использование наблюдений на суше (море) для анализа только в точках сетки, которые расположены над сушей (морем). Разработанный анализ имеет в 2–14 раз меньшую среднюю ошибку, а также в 1,5–2 раза меньшую среднеквадратичную ошибку относительной влажности, по сравнению с анализом СУД-ИОИ.

Для модели ПЛАВ был также разработан и впервые в России реализован двумерный вариационный алгоритм усвоения для приземной температуры. Подробно этот алгоритм представлен в работе [2].

Разработка новых объективных анализов для приземной температуры и влажности позволила в итоге успешно запустить схему усвоения почвенных переменных, согласованную с применяемой в модели ПЛАВ параметризацией процессов на поверхности суши с учетом растительности [5, 6, 11] (ISBA, Interaction Soil Biosphere Atmosphere). Эта параметризация весьма чувствительна к заданию начальных

значений для температуры и влагосодержания почвы, поэтому впервые в России была реализована схема усвоения для этих переменных [1]. В данной схеме ввиду отсутствия оперативных наблюдений для параметров почвы для коррекции значений почвенных переменных в каждой точке горизонтальной сетки используются инкременты анализа температуры и влажности на высоте 2 м. Реализованная схема коррекции почвенных переменных, предложенная D. Giard и E. Bazile [8], инициализирует следующие переменные: поверхностную температуру почвы, температуру глубинного слоя почвы, влагосодержание приповерхностного и глубинного слоя почвы

Совместное использование объективных анализов, параметризации ISBA и схемы коррекции для почвенных переменных позволили существенно улучшить прогноз температуры и относительной влажности на уровне 2 м в модели ПЛАВ. С лета 2007 года глобальная полулагранжева модель применяет параметризацию ISBA, анализы приземной температуры и относительной влажности, а также схему коррекции почвенных переменных в оперативном режиме.

Ежедневно во время сеанса для срока 06 ч ВСВ в блоке подготовки данных происходит обновление полей температуры поверхности океана (ТПО) и водного эквивалента снежного покрова на основе объективных анализов ТПО и высоты снежного покрова на модельной горизонтальной сетке, рассчитываемых в рамках системы АСОИИ на машинах Xeon4 (БД SHOT). Для расчета водного эквивалента снежного покрова используется эмпирическое значение плотности снега, зависящее от месяца года.

Затем в БПД производится считывание оперативных объективных анализов геопотенциала, ветра, относительной влажности на стандартных изобарических поверхностях и давления на уровне моря из БД S125. Эти анализы затем интерполируются по горизонтали с сетки $1,25^\circ \times 1,25^\circ$ на сетку модели $0,9^\circ \times 0,72^\circ$. Для всех полей, кроме относительной влажности, применяется специальная горизонтальная интерполяция, в которой по долготе осуществляется интерполяция в пространстве коэффициентов Фурье. Для относительной влажности используется билинейная интерполяция. После этого вычисляются инкременты температуры, ветра, относительной влажности на изобарических поверхностях и инкремент давления на уровне моря.

Полученные инкременты интерполируются по вертикали на модельные сигма-уровни. Для температуры и относительной влажности применяется линейная интерполяция по вертикали.

Полученные поля на модельной трехмерной сетке записываются в стартовый файл модели. Кроме того, блок подготовки данных выполняет интерполяцию стартовых полей модели на стандартные изобарические поверхности и записывает их в БД LAG1 и LAG2.

3. Программная реализация

Программные комплексы блока подготовки данных и полулагранжевой модели ПЛАВ написаны на языке Фортран 90. Отдельные фрагменты кода написаны на языке Фортран 77. В основном подпрограммы написаны с использованием норм программирования DOCTOR, устанавливающих правила именования переменных. Программные комплексы оперативной технологии распараллелены с помощью технологии OpenMP (перспективный вариант модели ПЛАВ реализован на основе сочетания технологий MPI и OpenMP). Компиляция и сборка модели и блока подготовки данных осуществляется с помощью команды make, использующей соответствующий Makefile. Makefile содержит список исходных файлов для компиляции, список необходимых библиотек и опции компиляции. Среди библиотек отметим xrd.a – библиотеку подпрограмм чтения/записи индексно-последовательных файлов GRIB в формате модели ARPEGE. Этот формат активно применяется в модели ПЛАВ. В результате работы make получается исполняемый файл модели либо блока подготовки данных. Все программные единицы имеют схожий интерфейс вызова, обеспечивающий считывание аргументов даты из командной строки вызова, а настройки путей к файлам – через файлы типа namelist.

На вычислительной системе SGI Altix4700 время работы оперативного сеанса на 8 процессорах для срока 00 ч ВСВ составляет 30–40 минут, а для срока 12 ч ВСВ – 40–50 минут. Блок подготовки данных и программы записи результатов прогнозов в базы работают на управляющем узле вычислительной системы из-за необходимости работы с удаленными базами данных системы АСОИИ. Расчет прогнозов производится через систему очередей PBSPro.

4. Расчет оценок прогнозов

В мае-июне 2010 года в Лаборатории перспективных численных методов Гидрометцентра России был разработан и внедрен в оперативное использование комплекс программ для ежедневного расчета оценок успешности прогнозов, полученных с помощью модели ПЛАВ, осреднения этих оценок за различные периоды времени, а также для формирования результирующих месячных и годовых отчетов в формате ВМО.

Значения оценок рассчитываются и заносятся в базы после того, как вся необходимая информация становится доступной. Например, для того, чтобы оценить результаты численного прогноза, произведенного в 00 ч ВСВ 24 апреля, необходимо иметь фактические значения полей метеорологических величин. В качестве фактических используются поля объективного анализа Гидрометцентра России на сетке $2,5^\circ \times 2,5^\circ$. Все эти значения становятся доступными не раньше, чем расчет соответствующего верифицирующего анализа в 04 ч ВСВ 29 апреля. Таким образом, минимальная задержка между датой получения прогноза и возможностью оценки его качества обусловлена заблаговременностью этого прогноза.

В оперативном режиме расчет прогнозов модели ПЛАВ стартует два раза в сутки: в 02:52 ВСВ – прогноз на пять суток по данным за 00 ч ВСВ и в 14:52 ВСВ – прогноз на десять суток по данным на 12 ч ВСВ. Для каждого из этих сроков существует своя база оценок. Каждая база состоит из шести файлов, соответствующих рассматриваемым регионам. Этими регионами являются требуемые в обязательном порядке Комиссией по общим системам Всемирной метеорологической организации (КОС ВМО) тропики, Северное и Южное полушария, а также Россия, Европа и Азия. Начальной датой каждой из баз является 1 января 2010 года. Полями каждой из региональных баз являются заблаговременность прогноза, оцениваемая метеовеличина, вид оценки.

Количество заблаговременностей в каждой из баз определяется временем старта прогноза. В соответствии с рекомендациями КОС ВМО рассчитываются следующие оценки: осредненные по соответствующим регионам средние и среднеквадратические ошибки прогнозов, корреляции аномалий и тенденций, а также градиентная ошибка. Оцениваются следующие поля: давление на уровне моря, геопотенциал

на изобарических поверхностях 850, 500 и 250 гПа; температура на изобарических поверхностях 850, 500 и 250 гПа; модуль ветра на изобарических поверхностях 850, 500 и 250 гПа; поле температуры на уровне 2 м.

Значения оцениваемых полей прогнозов читаются из выходных файлов модели и интерполируются на сетку $2,5^\circ \times 2,5^\circ$. Значения фактических полей считываются из файлов объективного анализа, скопированных из базы данных S125. При наличии каких-либо ошибок чтения, а также при нереалистических значениях полей в базу оценок записывается число 999. В дальнейшем такие значения не участвуют в осреднении за требуемый период времени.

Ежемесячно после 16 ч ВСВ пятого числа каждого месяца, после того как становится возможным оценивание пятисуточного прогноза за последний день предыдущего месяца, формируется отчет для отправки в ВМО. В этот отчет входят осредненные за прошедший календарный месяц оценки пятисуточных прогнозов по сроку 00 ВСВ, а также оценки десятисуточных прогнозов по сроку 12 ч ВСВ, осредненные за период с 25 или 26 числа (в зависимости от месяца) позапрошлого месяца по 25 или 26 числа предыдущего месяца. Кроме того, по итогам календарного года формируется годовой отчет с оценками успешности прогнозов.

Заключение

Реализация модели ПЛАВ в оперативном режиме стала возможной благодаря Ж.-Ф. Желену, Метео-Франс и консорциуму ALADIN/LACE, любезно предоставившим параметризацию процессов подсеточного масштаба. Авторы выражают благодарность Р.Б. Зарипову за оказанную помощь в реализации оперативной технологии и работах по усовершенствованию модели ПЛАВ; А.Н. Багрову – за разработку анализов температуры поверхности океана и высоты снежного покрова на сетке модели ПЛАВ; И.И. Жабиной, С.В. Лубову, И.В. Маковской, А.Ю. Недачиной, Ю.А. Степанову – за помощь в реализации оперативной технологии модели ПЛАВ.

Работы, представленные в настоящей статье, выполнялись при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований 06-05-08109 офи, 09-05-12054 офи_м, 10-05-01066.

Список использованных источников

1. Богословский Н.Н., Толстых М.А. Реализация схемы усвоения для почвенных переменных в глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11, спец. выпуск. Ч. 3. – С. 20–25.
2. Богословский Н.Н., Шляева А.В., Толстых М.А. Усвоение почвенных и приземных переменных в глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13, спец. выпуск. С. 111–116.
3. Толстых М.А. Глобальная полулагранжевая модель численного прогноза погоды. – М.—Обнинск: ОАО ФОП, 2011. – 111 с.
4. Цырульников М.Д., Толстых М.А., Багров А.Н., Зарипов Р.Б. Развитие глобальной системы усвоения данных с переменным разрешением // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 4. – С. 5–24.
5. Bazile E., Haiti M. El, Bogatchev A., Spiridonov V. Improvement of the snow parameterization in ARPEGE/ALADIN. Proceedings of SRNWP // HIRLAM Workshop on Surface Processes, Turbulence and Mountain Effects; Madrid, 22–24 October 2001. – January 2002.
6. Boone A., Masson V., Meyers T., Noilhan J. The Influence of the Inclusion of Soil Freezing on Simulations by a Soil–Vegetation–Atmosphere Transfer Scheme // J. of Applied Meteorology. – 2000. – V. 39. – P. 1544–1569.
7. Geleyn J.-F., Bazile E., Bougeault P., Deque M., Ivanovici V., Joly A., Labbe L., Piedelievre J.-P., Piriou J.-M., Royer J.-F. Atmospheric parameterization schemes in Meteo-France's ARPEGE N.W.P. model // Procs. of ECMWF Seminar on Parameterization of subgrid-scale physical processes 5–9 September 1994. – Reading, UK: ECMWF. – 1995. – P. 385–402.
8. Giard D., Bazile E. Implementation of a new assimilation scheme for soil and surface variables in a global NWP model // Mon. Wea. Rev. – 2000. – Vol 128. – P. 997–1015.
9. Masson V., Champeaux J.-L., Chauvin F., Meriguet C., Lacaze R. A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models // J. of Climate. – 2003. – V. 16. – P. 1261–1282.
10. Navascués B. Analysis of 2 meter Temperature and Relative Humidity. – HIRLAM Technical Report, No. 28, Norrköping, January 1997.
11. Noilhan J., Planton S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models // Mon. Wea. Rev. – 1989. – Vol. 117. P. 536 – 549.

Поступила в редакцию 01.06.2011 г.