УДК 551.509.313.001.572

Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ

М. А. Толстых *,**, Ж.-Ф. Желен***, Е. М. Володин*,
Н. Н. Богословский**,****, Р. М. Вильфанд**, Д. Б. Киктев**, Т. В. Красюк**,
С. В. Кострыкин*, В. Г. Мизяк**, Р. Ю. Фадеев*, В. В. Шашкин*,**,
А. В. Шляева**,*****, И. Н. Эзау******, А. Ю. Юрова**,*******

Глобальная гидродинамическая модель атмосферы ПЛАВ применена для оперативного среднесрочного прогноза погоды, а также в качестве компонента системы вероятностного долгосрочного прогноза. Приведен обзор предшествующего развития модели и отмечены ее особенности. Описаны существующие версии модели. На основе этих версий разработана унифицированная многомасштабная версия модели, предназначенная для численного прогноза погоды и для моделирования изменений климата. С помощью этой версии выполнены численные эксперименты по моделированию климата в соответствии с протоколом международного эксперимента AMIP2. Представлены первые результаты. Показана возможность применения унифицированной версии модели ПЛАВ как для среднесрочного прогноза погоды, так и для моделирования изменений климата (после некоторой доработки).

Ключевые слова: глобальная гидродинамическая модель атмосферы, численный прогноз погоды, моделирование изменений климата, параметризации процессов подсеточного масштаба, численное решение уравнений динамики атмосферы.

1. Введение

Численное моделирование атмосферы являлось одним из направлений деятельности Г. И. Марчука, чье 90-летие отмечается в 2015 г. На основе его работ, изложенных в монографии “Численные методы в прогнозе погоды” (вышла в СССР в 1967 г. [6] и затем была переведена на английский язык издательством Academic Press в 1974 г.), А. Робером был предложен полунеявный метод [9], который позволяет увеличить шаг по времени в моделях динамики атмосферы в 3—5 раз по сравнению с явными схемами интегрирования по времени. Этот метод до сих пор используется в том или ином виде в большинстве моделей атмосферы. Под руководством Г. И. Марчука также была разработана одна из

* — *Институт вычислительной математики Российской академии наук; e-mail: tolstykh@m.inm.ras.ru.*
** — *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации.*
*** — *Национальный центр метеорологических исследований Метео-Франс, Тулуза, Франция.*
**** — *НИУ Томский государственный университет, Томск.*
***** — *Канадский метеорологический центр, Монреаль, Канада.*
****** — *Центр Исследований Окружающей Среды и Дистанционного Зондирования Земли им. Ф. Нансена /Центр Исследований Климата им. Бъеркнеса, Берген, Норвегия.*
******* — *Научный фонд “Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена”.*

первых в мире совместная гидродинамическая модель атмосферы и океана [7]. Заслуги Г. И. Марчука в этой области были отмечены в 2000 г. почетной медалью Европейского геофизического общества (ныне Европейский геофизический союз).

Основным результатом применения метода расщепления по физическим процессам, обоснованным Г. И. Марчуком, является использование максимально возможного с физической точки зрения шага по времени для каждого из процессов, описанного в модели атмосферы. Дальнейшим развитием этой идеи явилось соединение полунеявного метода интегрирования по времени модели уравнений динамики атмосферы [7] с полулагранжевым представлением адвекции [28] и переход на двухслойную схему интегрирования [20]. Такой подход позволяет увеличить шаг интегрирования по времени еще в несколько раз по сравнению с эйлеровыми методами.

На основе полулагранжева полунеявного алгоритма разработана глобальная полулагранжева модель общей циркуляции атмосферы ПЛАВ (Полулагранжева, основанная на уравнении абсолютной завихренности) [11, 12]. Модель применяется для оперативного среднесрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России и СибНИГМИ, а также в качестве компонента системы вероятностного долгосрочного прогноза в Гидрометцентре России.

Концепция многомасштабной модели атмосферы (или бесшовного прогноза) появилась в 2005 г. [21, 27]. Она состоит в том, что в атмосфере не существует искусственных временных границ, разделяющих мезомасштабные, синоптические, сезонные и межгодовые масштабы. В силу нелинейности атмосферы все временные масштабы взаимодействуют между собой. Таким образом, модель общей циркуляции атмосферы, ориентированная на воспроизведение каких-либо временных масштабов, должна адекватно воспроизводить процессы всех временных масштабов. Часто это влечет за собой необходимость подключения к модели атмосферы новых моделей-компонентов Земной системы (океана, морского льда, деятельного слоя почвы, малых газовых составляющих и т. д.). Ведущие прогностические центры — Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды, Метеослужба Великобритании — уже в ближайшие годы планируют применять такие модели для среднесрочного прогноза погоды.

В данной статье после обзора предшествующего развития глобальной гидродинамической модели атмосферы ПЛАВ представлена работа по созданию унифицированной версии этой модели, а также показаны первые результаты воспроизведения атмосферной циркуляции. Эта версия может быть использована как для численного прогноза погоды разной заблаговременности, так и для моделирования изменений климата, таким образом, является многомасштабной.

2. Особенности глобальной модели атмосферы ПЛАВ

Оригинальными особенностями блока решения уравнений динамики атмосферы модели ПЛАВ являются использование вертикального компонента абсолютной завихренности и дивергенции в качестве прогностических переменных и применение конечных разностей четвертого порядка на несмещенной сетке для аппроксимации неадвективных слагаемых уравнений. Изначально главной задачей при разработке модели было достижение максимальной точности среднесрочного прогноза погоды при минимальных вычислительных затратах, поэтому применение несмещенной по горизонтали сетки (или сетки А, согласно

Аракаве [8]) казалось желательным, так как позволяло избежать вычисления нескольких траекторий для каждой ячейки сетки в полулагранжевой модели, а также двухмерных операторов осреднения. Однако, как известно из классической работы [8], на сетке A в традиционной формулировке уравнений атмосферы плохо описываются процессы распространения инерционно-гравитационных волн. Применение пары вертикальный компонент абсолютной завихренности — горизонтальная дивергенция в качестве прогностических переменных позволяет использовать в конечно-разностной полулагранжевой модели несмещенную сетку (иногда называемую сеткой Z), обеспечив при этом такие же характеристики распространения гравитационных волн, как на сетках B и C, и несколько лучшие для инерционно-гравитационных волн и волн Россби [23, 25].

Важным элементом модели атмосферы, основанной на переменных вертикальный компонент абсолютной завихренности — горизонтальная дивергенция, является быстрый и точный алгоритм восстановления компонентов горизонтальной скорости ветра, описанный в работе [33]. В [32] было показано, что версия модели ПЛАВ для решения уравнений мелкой воды на сфере, использующая данный алгоритм, в наиболее сложных экспериментах набора стандартных задач [34] достигла уровня ошибок, характерного для спектральной модели эквивалентного разрешения.

В работе [2] была представлена трехмерная версия модели, которая имела разрешение 1,5° по долготе и широте, 20 уровней по вертикали. В дальнейшем разрешение модели повышалось, и возникла необходимость в эффективной параллельной реализации модели. Работы по распараллеливанию модели представлены в [4]. Современное состояние блока решения уравнений динамики атмосферы, а также новая версия этого блока, локально и глобально сохраняющая массу воздуха, описаны в работе [26].

В модели ПЛАВ наряду с оригинальным блоком решения уравнений динамики атмосферы собственной разработки в основном применяются алгоритмы параметризаций процессов подсеточного масштаба, разработанные под руководством Ж.-Ф. Желена возглавляемым Францией Консорциумом по мезомасштабному прогнозу погоды ALADIN/LACE [17, 18]. В модель также включены отечественная параметризация крупномасштабных осадков [4] и модель многослойной почвы [3]. Ведутся работы по усовершенствованию описания процессов подсеточного масштаба, некоторые из которых кратко представлены в данной статье.

3. Существующие версии модели ПЛАВ

Оперативный вариант модели ПЛАВ в версии для среднесрочного прогноза погоды имеет горизонтальное разрешение 0,9 × 0,72° по долготе и широте (примерно 75 *км* в средних широтах) и 28 уровней по вертикали. Параметризации в основном соответствуют уровню модели ALADIN 2006 г. с некоторыми усовершенствованиями. В отличие от оригинальной параметризации в модели ПЛАВ в схеме глубокой конвекции применяется замыкание типа Куо в случаях, когда температура на нижнем модельном уровне ниже определенного порогового значения, иначе применяется замыкание на основе конвективной доступной потенциальной энергии (CAPE) [30].

Эта версия внедрена в оперативную эксплуатацию в Гидрометцентре России в начале 2010 г. и можно подвести некоторые итоги. На рис. 1*а* показана среднемесячная ошибка прогноза давления на уровне моря во внетропической

части Северного полушария в период с 2008 по 2014 г. по отношению к полю объективного анализа разных центров прогноза погоды, на рис. 1*б* представлена аналогичная оценка для поля высоты поверхности 500 *гПа*, а на рис. 1*в* — для ошибки модуля ветра на уровне 250 *гПа* (по данным Ведущего центра ВМО по верификации детерминистических прогнозов http://apps.ecmwf.int/wmolcdnv). Внедрение в качестве основного численного метода в начале 2010 г. глобальной модели ПЛАВ позволило примерно в два раза сократить отставание России по сравнению с лидирующей группой мировых прогностических центров в ошибках прогноза таких важных величин, как давление на уровне моря, температура на изобарической поверхности 850 *гПа* и высота изобарической поверхности 500 *гПа*.

Для повышения точности прогноза приземной температуры и влажности в рамках оперативной технологии впервые в России было реализовано усвоение температуры и влагосодержания почвы [1]. Также впервые в России в оперативном режиме был реализован вариационный объективный анализ приземной температуры (2D-Var) [2]. С помощью данной версии также исследовано влияние подключения параметризации болот на ошибку прогноза приземной температуры и влажности [35].

В Новосибирске в СибНИГМИ оперативно эксплуатируется усовершенствованный вариант модели с переменным разрешением по широте [31], меняющимся от 30 *км* в полосе широт 48—90° с. ш. до 70 *км* в Южном полушарии. Разрешение по долготе в этой версии модели составляет 0,5625° (62 *км* на экваторе, 31 *км* на широте 60° с. ш.), число уровней по вертикали — 50.

Помимо версии модели ПЛАВ для среднесрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России оперативно применяется вариант модели, ориентированный на вероятностные долгосрочные прогнозы (на временных масштабах от месяца до сезона). Этот вариант имеет горизонтальное разрешение 1,40625° по долготе, 1,125° по широте при том же числе вертикальных уровней (28). Результаты исторических сезонных прогнозов с помощью этой версии модели подробно представлены в работе [13] . В этой версии модели используется динамико-стохастическая схема крупномасштабной конденсации, разработанная в Институте вычислительной математики РАН [5]. В этом случае конденсация в ячейке модельной сетки наступает, когда значение удельной массовой доли влаги с учетом дисперсии в этой ячейке больше значения при точке росы. Дисперсия распределения влаги задана по данным наблюдений как функция температуры и давления. Данная схема особенно полезна для версий модели, имеющих горизонтальное разрешение порядка 100 *км* и грубее, которые предназначены для долгосрочных прогнозов и моделирования климата. Этот вариант модели атмосферы был также соединен с моделью Мирового океана ИВМ РАН, результаты исторических сезонных прогнозов представлены в работе [13].

С момента оперативных испытаний модели ПЛАВ в 2009 г. в мире существенно увеличилось горизонтальное и вертикальное разрешение глобальных моделей. Поэтому была разработана новая версия модели ПЛАВ для среднесрочного прогноза погоды, имеющая горизонтальное разрешение около 20—25 *км* и 51 уровень по вертикали, разрешение по широте меняется от 0,178° в Северном полушарии до 0,24° в Южном. Таким образом, разрешение модели по широте в средних широтах Северного полушария составляет около 20 *км*, а в Южном — около 26 *км*. В этой версии в блоке решения уравнений динамики атмосферы реализованы более точные и локально-консервативные аппрокси-

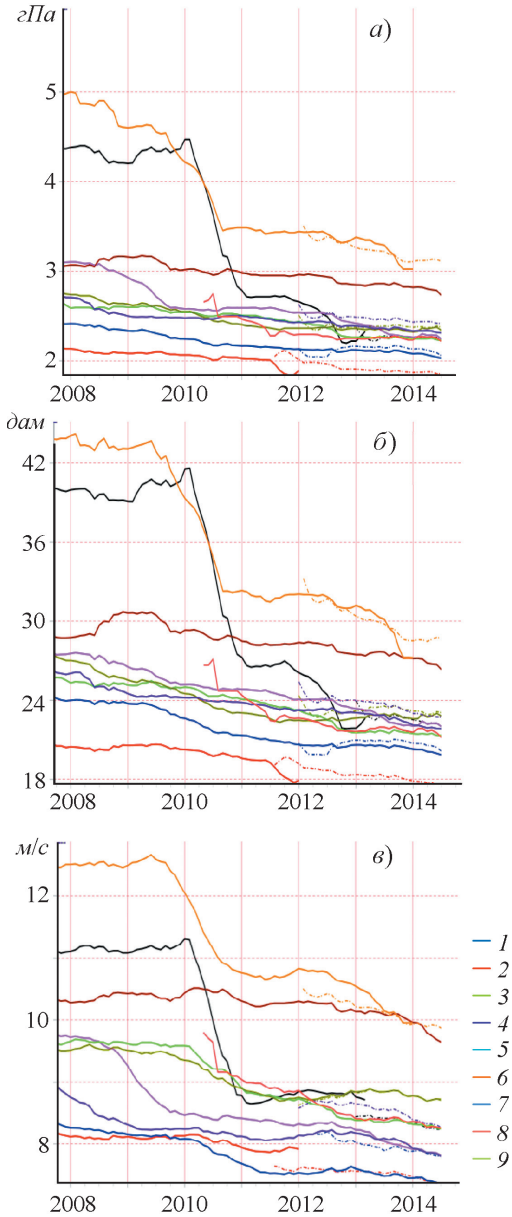

Рис. 1. Среднемесячные среднеквадратические ошибки прогнозов на 72 *ч* (скользящее среднее за 12 месяцев) разных прогностических центров во внетропической части Северного полушария по отношению к объективному анализу соответствующего центра для давления на уровне моря (*а*), высоты изобарической поверхности 500 *гПа* (*б*) и модуля ветра на изобарической поверхности 250 *гПа* (*в*) за период 2008—2014 гг. по данным Ведущего центра ВМО по верификации детерминистических прогнозов.

Ошибки прогнозов Гидрометцентра России — желто-коричневые линии.

мации операторов градиента, дивергенции и вихря скорости. Наиболее заметно повышение точности вблизи полюсов. Применение таких аппроксимаций позволило уменьшить коэффициент горизонтальной диффузии дивергенции, что должно способствовать более реалистичному воспроизведению спектра кинетической энергии. Новая версия модели имеет более совершенные пара-

метризации процессов подсеточного масштаба. Применяется свободно распространяемая параметризация коротковолновой радиации CLIRAD-SW [16, 29], предварительно проверенная в работе [14], а также свободно распространяемая параметризация длинноволновой радиации RRTM [22]. Для параметризации микрофизических процессов неконвективного характера применяются алгоритмы, разработанные консорциумом RC-LACE ([15, 19], части 1 и 3 раздела 2). Также включено трехмерное климатическое распределение содержания озона и аэрозоля, зависящее от месяца. Данная версия модели находится в стадии оперативных испытаний в Гидрометцентре России, предварительные результаты испытаний говорят об уменьшении ошибок прогноза. Подробное описание этой версии предполагается опубликовать в отдельной статье.

4. Унифицированная многомасштабная версия модели ПЛАВ

Как было указано выше, модель общей циркуляции атмосферы, ориентированная на воспроизведение каких-либо временных масштабов, должна адекватно отражать процессы всех временных масштабов. Кроме того, затраты на поддержку нескольких разных версий одной и той же модели, различающихся наборами используемых параметризаций, номенклатурой прогностических полей и др., неоправданно высоки. Поэтому была поставлена задача создания глобальной модели для бесшовного прогноза с заблаговременностью от дня до нескольких лет на основе унификации нескольких версий модели ПЛАВ.

На основе ранее разработанных версий глобальной модели атмосферы ПЛАВ создана унифицированная версия модели. Эта версия может быть использована как для численного прогноза погоды разной заблаговременности, так и для моделирования изменений климата, таким образом, она является многомасштабной. Параметризации процессов подсеточного масштаба в основном соответствуют новой версии модели, предназначенной для среднесрочного прогноза погоды (см. выше).

Работы по созданию такой модели начались с подключения к модели атмосферы ПЛАВ блока параметризации процессов в почве, разработанного и применяемого в рамках модели Земной системы ИВМ РАН [3]. Модель тепло- и влагообмена в многослойной почве ИВМ РАН была внедрена в модель атмосферы ПЛАВ вместо ранее использовавшейся параметризации ISBA [24], имеющей всего два слоя в почве. Модель почвы ИВМ РАН была дополнена усовершенствованным описанием зависимости коэффициентов теплопроводности от водности и ледности. Используется восемь слоев в почве. Результаты тестовых расчетов продемонстрировали преимущество нового метода описания тепло- и влагообмена в почве перед ранее применяемой схемой при расчетах для периода оттаивания почвы (апрель) для территории России и Азии как для среднесрочного, так и для долгосрочного численного прогноза погоды. Более подробно эти работы предполагается осветить в отдельной статье.

В многомасштабную версию модели включена усовершенствованная схема параметризации широкополосного альбедо снега, в которой изменение этого параметра по мере выпадения свежего снега производится плавно, а также учитывается зависимость альбедо от зенитного угла солнца [10].

В режиме моделирования климата в программном комплексе унифицированной версии модели предусмотрено периодическое изменение нижних граничных условий, а также выдача необходимых характеристик в соответствии с

требованиями протоколов международных экспериментов AMIP, CHFP и т. п. (например, всех компонентов потоков импульса, тепла и влаги на поверхности). Вывод данных, необходимый для моделирования изменений климата, был распараллелен с помощью технологии MPI путем сбора данных на мастер-процессор. Горизонтальное разрешение модели в конфигурации для исследования изменений климата составляет $0{,}9 \times 0{,}72°$ по долготе и широте соответственно, 28 уровней по вертикали (совпадает с разрешением оперативной версии, предназначенной для среднесрочного прогноза погоды).

Для унифицированной версии модели ПЛАВ разработана и проверена версия динамического блока модели, сохраняющая массу [26]. Следует отметить, что локальное и глобальное сохранение массы переносимого вещества (воздуха и малых газовых составляющих) относится к числу важных требований к моделям атмосферы, предназначенных для моделирования изменений климата.

5. Результаты численных экспериментов

Унифицированная версия модели была проверена на среднесрочном прогнозе погоды с заблаговременностью 120 *ч* для всех дней января и июля 2014 г. Прогнозы стартовали с начальных данных за срок 12 *ч* ВСВ. На рис. 2*а*,*б*, показано сравнение среднеквадратических ошибок прогнозов высоты изобарической поверхности 500 *гПа* и давления на уровне моря по внетропической части Северного полушария для унифицированной модели и оперативной версии модели ПЛАВ для заблаговременностей прогноза от 24 до 120 *ч* (по отношению к объективному анализу Гидрометцентра). Можно видеть, что вследствие более совершенных параметризаций процессов подсеточного масштаба и усовершенствований динамического ядра ошибки среднесрочного прогноза несколько меньше у унифицированной версии модели.

Немаловажным преимуществом унифицированной модели по сравнению с оперативной версией является более эффективное использование вычислительных ресурсов. Оперативная версия на основе технологии распараллеливания OpenMP может использовать до 16 процессорных ядер (эффективно лишь 8), в то время как унифицированная версия, использующая сочетание технологий MPI и OpenMP, практически линейно масштабируется при данном разрешении

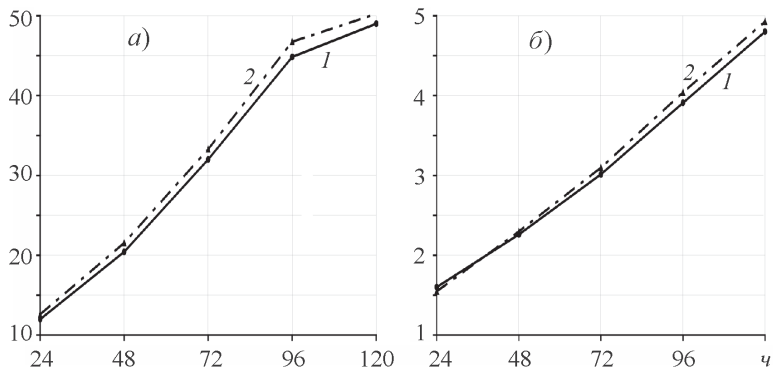

Рис. 2. Среднеквадратические ошибки прогнозов высоты изобарической поверхности 500 *гПа* (*а*) и давления на уровне моря (*б*) по внетропической части Северного полушария в январе и июне 2014 г. для унифицированной (*1*) и оперативной версии (*2*) модели ПЛАВ и заблаговременности прогноза от 24 до 120 *ч* (по отношению к объективному анализу Гидрометцентра).

до 64 процессорных ядер, при использовании 128 ядер все еще заметно ускорение выполнения программы по сравнению с 64 ядрами. Это крайне важно для планируемого использования модели для моделирования изменений климата.

С помощью унифицированной версии модели ПЛАВ был выполнен экспериментальный расчет атмосферной циркуляции на 6 лет по протоколу международного эксперимента AMIP2 с известными, меняющимися во времени полями температуры поверхности океана и концентрации морского льда, для начальных данных за 1 января 1979 г.

Предварительные оценки модельной климатологии показывают, что модель воспроизводит основные крупномасштабные особенности наблюдаемой атмосферной динамики. Среднее за январь давление на уровне моря в модели (представлено на рис. 3) в основном близко к наблюдаемому (лишь алеутский

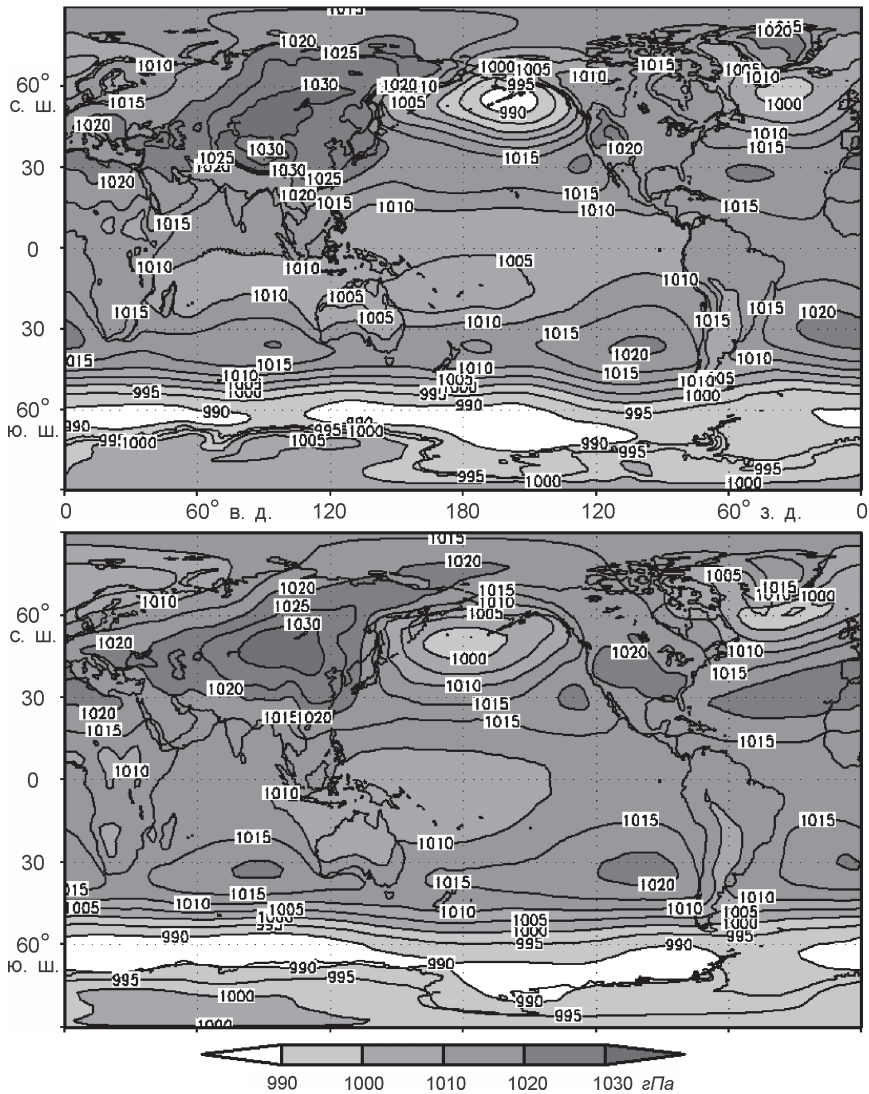

Рис. 3. Среднее за январь поле давления на уровне моря (*гПа*) по данным модели (*а*) и реанализа NCEP (*б*).

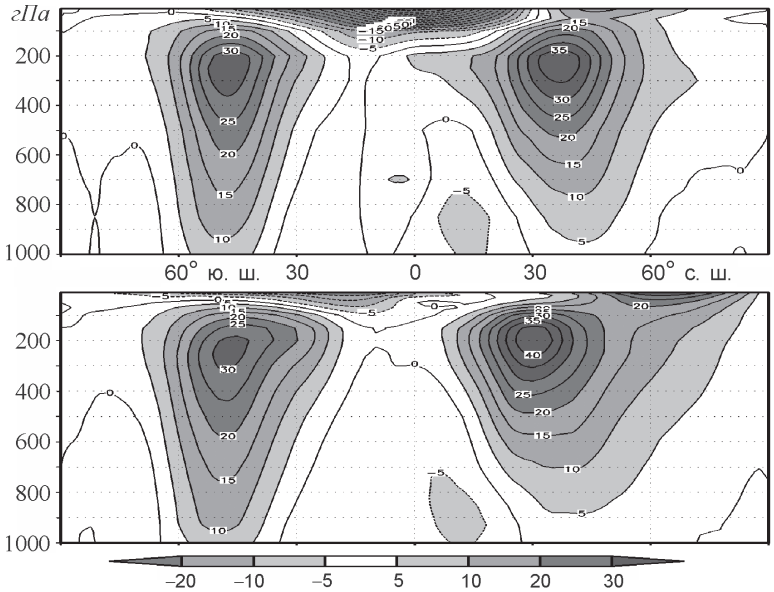

Рис. 4. Среднее за январь поле скорости зонального ветра (*м*/*с*), осредненной вдоль круга широты, по данным модели (*а*) и реанализа ERA (*б*).

минимум давления сдвинут в модели к северо-востоку и выражен сильнее по отношению к данным наблюдений). Скорость зонального ветра в модели в тропосфере (рис. 4) также близка к данным наблюдений. Некоторое завышение скорости восточного ветра в стратосфере в тропиках может быть связано с особенностями динамической схемы на экваторе, которые, по-видимому, требуют корректировки. С этими же особенностями может быть связано и появление слабых западных ветров вместо восточных в тропической нижней тропосфере.

Анализ структуры поля потока тепла на север, порождаемого стационарными волнами (зимой), позволяет сделать следующие выводы. В тропосфере северного полушария поток достигает 10—15 К·*м*/*с*, что соответствует данным реанализа NCEP/NCAR. В стратосфере модель занижает данную величину (35 К·*м*/*с* по сравнению с 60 К·*м*/*с* по архиву NCEP/NCAR). Поскольку поток температуры пропорционален вертикальному потоку энергии волн Россби, можно констатировать, что стационарные волны распространяются в стратосферу в модели менее эффективно, чем в природе. Такой недостаток присущ многим моделям общей циркуляции атмосферы.

В целом качество воспроизведения современного климата моделью ПЛАВ можно считать неплохим, и после некоторой настройки модель, по-видимому, может быть успешно состыкована с моделью океана. В заключение следует заметить, что данные расчеты выполнялись с помощью версии модели, имеющей апостериорный корректор массы атмосферы. В дальнейшем для моделирования изменений климата планируется применять локально-консервативную версию динамического блока модели [23].

6. Заключение

Внедрение глобальной модели атмосферы ПЛАВ, разработка которой многие годы поддерживалась и вдохновлялась Г. И. Марчуком, в оперативную

практику в Гидрометцентре России позволило существенно сократить отставание России по качеству среднесрочных прогнозов погоды от ведущих мировых центров. Таким образом, основная задача, ставившаяся при разработке модели, была решена.

Представленные в статье работы по унификации разных версий модели ПЛАВ привели к созданию на их основе многомасштабной модели атмосферы. Показана возможность применения модели ПЛАВ как для среднесрочного прогноза погоды, так и — после некоторой доработки — для моделирования изменений климата.

Исследования, представленные в разделах 4 и 5, выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-27-00126) в Институте вычислительной математики РАН. Остальные исследования выполнялись в ИВМ РАН и Гидрометцентре России при частичной поддержке Программ фундаментальных исследований РАН 43 и 15, а также проекта РФФИ (13-05-00868).

Литература

1. Богословский Н. Н., Толстых М. А. Реализация схемы усвоения для почвенных переменных в глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды. — Вычислительные технологии, 2006, т. 11, спецвыпуск, 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, спецвыпуск, с. 111—116.

3. Володин Е. М., Лыкосов В. Н. Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность — почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 1998, т. 34, № 4, с. 453—465.

4. Володин Е. М., Толстых М. А. Параллельные вычисления в задачах моделирования климата и прогноза погоды. — Вычислительные методы и программирование, 2007, т. 8, с. 113—122.

5. Кострыкин С. В., Эзау И. Н. Динамико-стохастическая схема расчета крупномасштабных осадков и облачности. — Метеорология и гидрология, 2001, № 7, с. 23—39.

6. Марчук Г. И. Численные методы в прогнозе погоды. — Л., Гидрометеоиздат, 1967, 353 с.

7. Марчук Г. И., Дымников В. П., Залесный В. Б. и др. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана. — Л., Гидрометеоиздат, 1984, 318 с.

8. Мезингер Ф., Аракава А. Численные методы, используемые в атмосферных моделях. Т. 1. — Л., Гидрометеоиздат, 1979, 89 с.

9. Робер А. Полунеявный метод. /В кн.: Численные методы, используемые в атмосферных моделях. Т. 2 Пер. с англ., под ред. В. П. Садокова. — Л., Гидрометеоиздат, 1982, с. 302—315.

10. Толстых М. А. Влияние параметризации альбедо снега в глобальной модели атмосферы на среднесрочные и долгосрочные численные прогнозы. — Труды Гидрометцентра России, 2014, вып. 352, с. 139—149.

11. Толстых М. А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. — М, Обнинск, ОАО ФОП , 111 с.

12. Толстых М. А. Полулагранжева модель атмосферы с высоким разрешением для численного прогноза погоды. — Метеорология и гидрология, 2001, № 4, с. 5—16.

13. Толстых М. А., Дианский Н. А., Гусев А. В., Киктев Д. Б. Воспроизведение сезонных аномалий атмосферной циркуляции при помощи совместной модели. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2014, т. 50, № 2, с. 131—142.

14. Юрова А. Ю., Толстых М. А. Анализ погрешностей двух алгоритмов расчета солнечного излучения для моделей общей циркуляции атмосферы. — Труды Гидрометцентра России, 2012, вып. 348, с. 56—63.

15. Catry B., Geleyn J.-F., Tudor M., et al. Flux-conservative thermodynamic equations in a mass-weighted framework. — Tellus A, 2007, vol. 59, No. 1, pp. 71—79.

16. Chou M.-D. and Suarez M. J. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies — 1999. NASA Tech. Memo. 10460, vol. 15, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 48 p.

17. De Troch R., Hamdi R., van de Vyver H., et al. Multiscale Performance of the ALARO-0 Model for Simulating Extreme Summer Precipitation Climatology in Belgium. — J. Climate, 2013, vol. 26, pp. 8895—8915.

18. Geleyn J.-F., Bazile E., Bougeault P., et al. Atmospheric parameterization schemes in Meteo-France's ARPEGE N.W.P. model. / In: Parameterization of subgrid-scale physical processes, ECMWF Seminar proceedings. — Reading, UK; 1994; pp. 385—402.

19. Gerard L., Piriou J.-M., Broňkova R., et al. Cloud and Precipitation Parameterization in a Meso-Gamma-Scale Operational Weather Prediction Model. — Mon. Wea. Rev., 2009, vol. 137, pp. 3960—3977.

20. Hortal M. The development and testing of a new two-time-level semi-Lagrangian scheme (SETTLS) in the ECMWF forecast model. — Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 2002, vol. 128, pp. 1671—1688.

21. Hoskins B. The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: A stimulus for our science. — Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 2013, vol. 139, pp. 573—384.

22. Mlawer E. J., Taubman S. J., Brown P. D. et al. RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. — J. Geophys. Res., 1997, vol. 102, No. 16, pp. 663-16, 682.

23. Neta B. and Williams R. T. Rossby wave frequencies and group velocities for finite element and finite difference approximations to the vorticity-divergence and primitive forms of the shallow water equations. — Mon. Wea. Rev., 1989, vol. 17, pp. 1439—1457.

24. Noilhan J. and Mahfouf J.-F. The ISBA land surface parameterisation scheme. — Global Planet. Change, 1996, vol. 13, pp. 145—149.

25. Randall D. A. Geostrophic adjustment and the finite-difference shallow water equations. — Mon. Wea. Rev., 1994, vol. 122, pp. 1371—1377.

26. Shashkin V. V. and Tolstykh M. A. Inherently mass-conservative version of the semi-Lagrangian Absolute Vorticity (SL-AV) atmospheric model dynamical core. — Geosci. Mod. Develop., 2014, vol. 7, pp. 407—417.

27. Shukla J., DelSole T., Fennessy M. et al. Climate model fidelity and projections of climate change. — Geophys. Res. Lett., 2006, vol. 33, L07702.

28. Staniforth A. and Сфтй J. Semi-Lagrangian integration schemes for atmospheric models. A review. — Mon. Wea. Rev., 1991, vol. 119, pp. 2206—2223.

29. Tarasova T. and Fomin B. The Use of New Parameterizations for Gaseous Absorption in the CLIRAD-SW Solar Radiation Code for Models. — J. Atmos. and Oceanic Technology, 2007, vol. 24, No. 6, pp. 1157—1162.

30. Tolstykh M. The use of combined closure in convection parameterization scheme. — Research activities in atmospheric and oceanic modeling, Rep. 33, J. Сфтй (ed.). WMO/TD 1161, 2003, pp. 04-25-04-26.

31. Tolstykh M. A. Variable resolution global semi-Lagrangian atmospheric model. — Russian J. Num. An. & Math. Mod, 2003, vol. 18, No. 4, pp. 347—361.

32. Tolstykh M. A. Vorticity-divergence semi-Lagrangian shallow-water model on the sphere based on compact finite differences. — J. Comput. Phys., 2002, vol. 179, pp. 180—200.

33. Tolstykh M. and Shashkin V. Vorticity-divergence mass-conserving semi-Lagrangian shallow-water model using the reduced grid on the sphere. — J. Comput. Phys., 2012, vol. 231, pp. 4205—4233.

34. Williamson D. L., Drake J. B., et al. A standard test set for numerical approximations to the shallow water equations in spherical geometry. — J. Comput. Phys., vol. 102, pp. 211—224.

35. Yurova A., Tolstykh M., Nilsson M., and Sirin A. Parameterization of mires in a numerical weather prediction model. — Water Res. Res., 2014, vol. 50, No. 11, pp. 8982—8996.

Поступила
9 II 2015