

ГЛОБАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

М.А. Толстых

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации
Институт вычислительной математики РАН
tolstykh@m.inm.ras.ru*

Введение

Лишь около десятка стран в мире развивают собственные технологии моделирования глобальной атмосферы (США, Англия, Канада, Франция, Япония, Германия, Австралия, Китай и Россия). Действительно, физика атмосферных процессов достаточно сложна и не до конца изучена (особенно процессы в облаках). Из-за ограниченности вычислительных ресурсов пространственное разрешение таких моделей недостаточно для прямого полного описания некоторых процессов (например, глубокой конвекции), поэтому такие процессы необходимо описывать параметрически, зная лишь характеристики атмосферы на масштабе характерного размера ячейки сетки (в настоящее время порядка 10 км по горизонтали). Разработка полного набора таких параметризаций является очень трудоемкой задачей, поэтому получила распространение научная кооперация в этой области. Описание динамики атмосферных процессов, которые могут быть явно описаны на такой сетке, тоже имеет свои особенности (например, вычислительная и параллельная эффективность). Таким образом, для развития и поддержки разработки таких моделей требуются усилия специалистов различного профиля. Наконец, для использования глобальных моделей атмосферы как в прогнозе погоды, так и в моделировании

изменений климата необходимы достаточно большие вычислительные ресурсы.

Первые модели численного прогноза погоды появились почти одновременно с появлением первых компьютеров. Это были весьма несовершенные модели, основанные на одном двумерном уравнении переноса атмосферного вихря. По мере развития вычислительной техники происходило постепенное усложнение моделей оперативного прогноза погоды: в середине 60-х годов XX века одно двумерное уравнение уступило место системе уравнений мелкой воды на сфере. К концу 60-х годов были разработаны вычислительные методы, позволяющие решать трехмерные уравнения атмосферы [1]. В свою очередь, дальнейшее повышение производительности компьютеров в начале 70-х годов привело к моделям атмосферы, основанным на полной трехмерной системе уравнений атмосферы. В дальнейшем развитие моделей атмосферы шло, наряду с повышением разрешения, в направлении все большего усложнения параметрического описания процессов подсеточного масштаба (например, уходящей и приходящей радиации, образования осадков, взаимодействия набегающего потока с рельефом).

Моделирование климата начало развиваться несколько десятилетий назад. Вначале климатические модели были фактически глобальными моделями атмосферы с фиксированной температурой поверхности океана. В дальнейшем климатические модели развивались в направлении большего усложнения, к ним постепенно подключались модели океана, почвы, морского льда и т. д.

Численный прогноз погоды и моделирование климата всегда являлись областями применения самых мощных для своего времени вычислительных систем. Например, первая серийная революционная для своего времени векторная вычислительная система Cray-1 была установлена в только что открывшемся тогда (1977 г.) международном Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) в Рэдинге (Великобритания).

В 90-х годах прошлого столетия за рубежом в метеорологических и климатических центрах появились параллельные вычислительные системы с распределенной памятью. Многие центры

выполнили работы по усовершенствованию своих моделей. Эти работы сопровождалась массовым внедрением технологии MPI, предназначенной для использования на параллельных вычислительных системах. Постепенно число процессоров, используемых моделями атмосферы, росло. В ряде оперативных моделей прогноза погоды используется от одной до нескольких тысяч процессоров. В моделировании климата число используемых процессоров уже достигает десятка тысяч, т. к. в моделях климатической системы, как правило, параллельно работают модели атмосферы, океана, морского льда и др.

По мере развития моделей атмосферы, прогресса вычислительной техники становится все более очевидно, что с улучшением параметризаций процессов подсеточного масштаба и повышением пространственного разрешения ошибки модельного климата уменьшаются [20, 21]. Это подтверждается и результатами по проекту сравнения моделей Земной системы CMIP3 (2007 г.) и CMIP5 (2013 г.). Также в последние десятилетия постепенно снижается уровень ошибок в численном прогнозе погоды (см., например, [51]).

Чем выше разрешение модели атмосферы (и, следовательно, размерность решаемой задачи), тем точнее мы можем описать рельеф земной поверхности (орографию) и его взаимодействие с атмосферным потоком. Более высокое разрешение модели атмосферы позволяет точнее описывать каскад энергии по спектру атмосферных движений, а в некоторых случаях перейти от параметрического к явному описанию атмосферных явлений (например, глубокой конвекции). Это, в свою очередь, способствует уменьшению ошибок прогноза.

Размерность вычислительной области в современных глобальных моделях прогноза погоды составляет порядка 10^8 ($1000 \times 1000 \times 100$), что определяется необходимостью разрешения мезомасштабных синоптических процессов. Численный прогноз погоды с высоким пространственным разрешением требует больших вычислительных ресурсов, в первую очередь в связи с тем, что оперативный прогноз налагает ограничение на допустимое время счета модели – не более 10–20 минут на расчет прогноза на 24 часа.

В моделировании климата атмосферы размерность задачи несколько меньше (10^6 – 10^7 для каждой из моделей), но требуется проведение массовых расчетов с моделями на столетия модельного времени, например по различным сценариям увеличения концентраций парниковых газов. Более высокое разрешение модели атмосферы, в частности, позволяет лучше воспроизводить изменчивость атмосферной циркуляции в тропиках. Согласно различным оценкам, минимально необходимое для этого горизонтальное разрешение климатической модели атмосферы составляет примерно 100 км (0,9 градуса), что дает минимальную размерность вычислительной области по горизонтали (400×200).

В области как прогноза погоды, так и моделирования климата атмосферы ставится задача достичь горизонтального разрешения порядка 1 км. В настоящее время вычислительные ресурсы не позволяют достичь в глобальных моделях такого разрешения. Повышение горизонтального разрешения глобальных моделей атмосферы до величины менее 7–10 км, ожидаемое в ближайшие несколько лет, будет означать переход на полные уравнения негидростатической сжимаемой атмосферы, избавленные от ряда упрощений, свойственных нынешним глобальным моделям атмосферы. Это приведет к существенному изменению вычислительных алгоритмов модели атмосферы. Вопросы реализации таких моделей кратко рассматриваются в разделе 3.

1. Блоки решений уравнений динамики атмосферы

В этом разделе мы коротко рассматриваем специфические численные методы аппроксимации по пространству и времени, используемые в блоках решения уравнений динамики в моделях атмосферы. Система трехмерных уравнений, которую аппроксимируют эти методы, представляет собой осредненные уравнения Навье-Стокса (уравнения Рейнольдса) на вращающейся сфере с дополнительным уравнением переноса водяного пара. Вклады от параметризаций процессов подсеточного масштаба составляют правые части этой системы, которая приводится во многих учебниках.

1.1. Традиционные численные методы

В конце 80-х годов модели численного прогноза погоды использовали конечно-разностные методы второго порядка либо спектральные эйлеровы методы решения уравнений гидротермодинамики атмосферы. Под спектральным методом мы будем понимать дискретизацию полных этих уравнений по долготе и широте на основе разложения всех переменных по сферическим функциям в сочетании с разностной дискретизацией по времени и вертикальной координате [25].

Достоинствами конечно-разностных методов являются их локальность и линейный рост числа арифметических операций по мере увеличения разрешения (по одной координате). По сравнению с традиционными конечно-разностными аппроксимациями второго порядка, в спектральном методе отсутствует фазовая ошибка и нелинейная неустойчивость. Другими достоинствами спектрального метода (реализованного на основе спектрально-сеточного преобразования) являются однородность разрешения на сфере, тривиальность решения эллиптических уравнений на сфере. Основным недостатком спектрального метода является нелокальность метода. Его параллельная реализация неизбежно требует глобальных обменов данными, что на современных массивно-параллельных вычислительных системах практически исключает использование более первого десятка тысяч процессорных ядер.

Раньше считалось, что основным недостатком этого метода является кубический рост числа арифметических операций по мере повышения разрешения. Однако в последние годы удалось построить приближенные варианты спектрального метода [45], сократившие вычислительные затраты, тем не менее проблема параллельной реализации при высоком разрешении осталась.

Примерно с конца 80-х годов появляются работы, посвященные исследованию и применению в моделировании атмосферы численных методов для дискретизации в горизонтальной плоскости, хорошо зарекомендовавших себя в других областях вычислительной газовой динамики. Рассматривались метод спектральных элементов [43], метод конечных элементов на икосаэдральных сетках [44], разрывный метод Галёркина на т.н. кубической сфере

[29]. В частности, новый блок решения уравнений динамики атмосферы в модели Земной системы CESM, реализован на основе метода спектральных элементов [11].

1.2. Полулагранжева адвекция

В настоящее время большинство глобальных и некоторые региональные модели численного прогноза погоды (например, ALADIN/AROME/HARMONIE [8], HIRLAM) применяют сеточный полулагранжев метод для описания адвекции [41]. Полулагранжев метод устраняет ограничение величины шага по времени условием Куранта, особенно жестким вблизи полюсов вследствие сходимости меридианов. Повышение шага по времени (в 3–5 раз) позволяет при заданном разрешении модели ускорить прогноз либо при заданном времени прогноза повысить горизонтальное разрешение. Такое повышение шага по времени не нарушает аппроксимации, так как ограничение по числу Куранта в атмосфере проявляется в основном при расчете достаточно гладких струйных течений в верхней тропосфере. По сравнению с эйлеровыми конечно-разностными схемами второго порядка, полулагранжев метод дает значительно меньшую фазовую ошибку в решении. В полулагранжевом методе адвекции формально отсутствует свойство сохранения массы переносимой величины, теоретически необходимое для интегрирования модели на длительные (несколько десятилетий и больше) сроки. Практика показала, что это не сильно влияет на качество решения при использовании модели с разрешением порядка градуса и выше для среднесрочного прогноза погоды. Отметим, что полулагранжев подход применяют в сочетании как с конечно разностным, так и со спектральными методами.

Однако в моделях, предназначенных для прогноза погоды на периоды длиннее сезона и экспериментов по моделированию климата, полулагранжев подход значительно менее распространен в силу того, что он не гарантирует выполнение законов сохранения массы и энергии. Помимо преимуществ от использования больших шагов по времени, полулагранжев метод позволяет рассчитывать перенос большого количества составляющих атмосферы (малых газовых составляющих, аэрозолей и т. д.) быстрее других

численных методов [22]. В современных моделях мирового уровня число подобных составляющих доходит до 100 и будет увеличиваться.

Поэтому в последние годы появились обобщения полулагранжева метода, сохраняющие массу переносимой величины, основанные на методе конечных объемов (например, [22, 35, 53]).

Полулагранжев метод локален, однако при больших числах Куранта требуется пересылка значительного количества данных. Частично эта проблема, по-видимому, решена [49] – удалось разработать программную реализацию полулагранжева переноса, масштабируемую на десятки тысяч ядер. Также рассматривается возможность ограничения шага по времени для минимизации количества пересылок.

1.3. Сетки на сфере

Традиционные широтно-долготные сетки давно успешно применяются в моделях глобальной атмосферы и океана. В последние годы, с повышением горизонтального разрешения моделей, стала заметной проблема неоднородности разрешения таких сеток по долготе и широте вблизи полюсов из-за сходимости меридианов к полюсу. Так, при разрешении 10 км по широте шаг регулярной широтно-долготной сетки по долготе вблизи полюса составляет величину порядка 100 м. Этот недостаток приводит к плохим свойствам конечно-разностной аппроксимации двумерных дифференциальных операторов вблизи полюсов, большому ограничению на число Куранта в эйлеровых моделях, проблемам в использовании параллельных итеративных алгоритмов, а также к неоправданным затратам на расчет «лишних» точек сетки (около 25 % от общих затрат).

Еще в 60-е годы прошлого века были предложены альтернативные сетки: редуцированные широтно-долготные сетки, икосаэдральные сетки, проекция куба на сферу. Сравнительно недавно к этим сеткам добавилась так называемая сетка Инь-Янь. Все эти сетки, кроме редуцированной широтно-долготной сетки, показаны на рисунке. Достоинства и недостатки каждой из представленных на рисунке сеток рассмотрены, например, в [5].

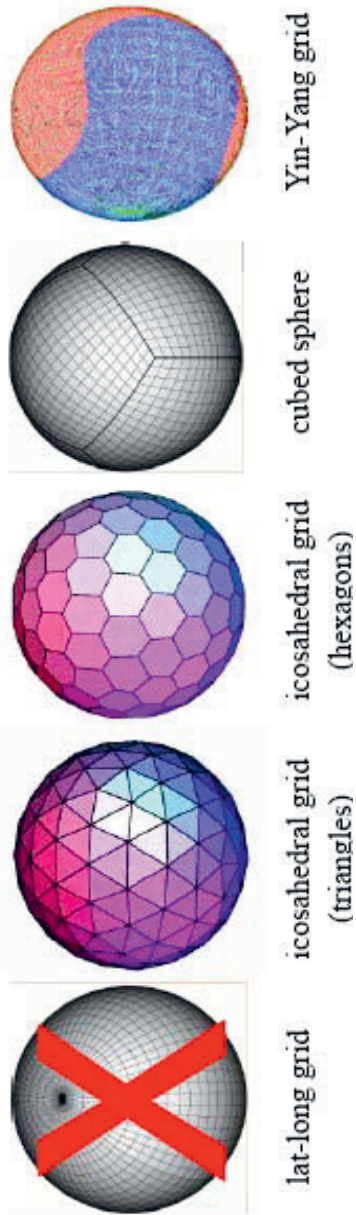


Рис. Различные сетки, используемые в глобальных моделях атмосферы (рис. из [36]), слева направо: широтно-долготная сетка, икосаэдральная сетка на основе треугольников, икосаэдральная сетка на основе шестиугольников, кубическая сфера, сетка Инь-Янь.

На сегодняшний день икосаэдральная треугольная сетка используется в модели немецкой метеослужбы ICON и института Макс Планка MPI-M [45, 51]. Кубическая сфера применяется в климатических моделях NCAR (CAM-SE) [10, 11] и GFDL AM3 [12], а сетка Инь-Янь с 2015 года применяется в оперативной модели Канадского метеорологического центра [31]. Икосаэдральная сетка с шестиугольниками применяется в экспериментальной версии модели ICON-IAP (Германия) [14] и NICAM [33] (Япония). Экспериментальная модель MPAS (США) [37] применяет сетку из шестиугольников, построенную особым образом, допускающим ее плавное сгущение. Отметим, что спектральные полулагранжевы модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды и американского NCEP применяют редуцированную широтно-долготную сетку [16].

1.4. Схемы интегрирования по времени

Разработанные Г.И. Марчуком в 60-х годах методы расщепления для задач метеорологии затем привели к созданию Робером полуявного метода [2], который позволяет использовать существенно большие шаги по времени по сравнению с явными схемами интегрирования. Полуявный метод предполагает интегрирование линейных слагаемых по неявной схеме, а нелинейных слагаемых и правых частей уравнений, описывающих стоки и источники соответствующих величин, – по явному алгоритму (подробнее см. [2]).

Полуявный метод интегрирования по времени применяется почти во всех глобальных моделях атмосферы. Так как будущие глобальные модели атмосферы неизбежно будут негидростатическими, полностью явная схема интегрирования по времени для таких моделей неэффективна (слишком малый шаг по времени, необходимый для интегрирования звуковых волн). В негидростатических моделях атмосферы в основном применяются явно-явные методы интегрирования по времени: неявное интегрирование только слагаемых уравнений, отвечающих процессам вертикальной адвекции и распространения волн по вертикали, интегрирование по явной схеме всех процессов по горизонтали (адвекция,

распространение различных волн). При этом применяется усовершенствованное расщепление по физическим процессам. Шаг по времени в явно-неявных методах определяется частотой самого быстрого волнового процесса в системе, интегрируемого по явной схеме (как правило, горизонтально распространяющиеся гравитационные волны для моделей в приближении гидростатики, звуковые вертикально распространяющиеся волны для негидростатических моделей). В некоторых негидростатических региональных моделях неявная схема интегрирования по времени применяется также для слагаемых уравнений, описывающих линеаризованные горизонтальные гравитационные волны, например MC2 (Канада) [15], ALADIN (Франция и страны Центральной и Восточной Европы) [8], аналогично глобальным гидростатическим моделям. Для тех слагаемых уравнений, которые интегрируются по явной схеме, применяется схема «чехарда» либо метод Рунге – Кутты третьего порядка точности.

При высоком разрешении модели, даже в случае удачи в конструировании устойчивой полунеявной аппроксимации, возникает проблема масштабируемости алгоритма решения системы линейных уравнений. Прямые методы решения возникающих систем уравнений с использованием быстрого преобразования Фурье неперспективны для работы на 10 000 и более процессорах. Итерационные методы дороже при реализации на одном процессоре, зато легче масштабируются, см., например, [28]. Однако можно предположить, что будущие вычислительные системы будут содержать процессоры, имеющие по несколько сотен ядер на кристалле. Поэтому, хотя явно-неявный метод интегрирования по времени представляется пока оптимальным для реализации на десятках и сотнях тысячах процессорных ядер, полунеявный метод, возможно, будет конкурентоспособен, с учетом как минимум пятикратного выигрыша в величине шага по времени.

2. Современное состояние описания процессов подсеточного масштаба

Здесь мы приводим лишь некоторые аспекты, развитые в последние годы. Подробнее эта тема рассматривается во многих недавних статьях и сборниках докладов семинаров Европейского

центра среднесрочных прогнозов погоды (<http://www.ecmwf.int>) и других, например (http://www.dtcenter.org/events/workshops15/mm_phys_15/)

Несмотря на растущее горизонтальное и вертикальное разрешение моделей атмосферы, целый ряд важнейших процессов в ней все еще приходится представлять параметрическим образом. По мере повышения доступных вычислительных ресурсов параметрические описания все более и более усложняются. Так, в глобальной оперативной модели атмосферы ПЛАН20 Гидрометцентра России вычислительные затраты на параметризацию составляют более 70 % от общего времени счета для версии с параметризацией микрофизических процессов. Сложность разработки новых параметризаций и особенно их валидации во многом определила возникшее за последние годы движение по открытию и обмену исходными программными кодами параметризаций. Наиболее ярко это проявилось в широком использовании в мире разработанной в США параметризации радиационных притоков тепла. С другой стороны, в недавно принятой в оперативную эксплуатацию новой глобальной модели немецкой метеослужбы (DWD) и института Макса Планка (MPI-M) ICON [46, 52] лишь две параметризации разработаны непосредственно в DWD, остальные параметризации являются разработками других центров.

Радиация. Необходимость параметризации этого процесса обусловлена необходимостью многократного решения переноса солнечного и длинноволнового излучения в атмосфере с учетом отражений и рассеяния для всего спектра с учетом облачности, что ведет к огромным вычислительным затратам. В последнее десятилетие широкое распространение в моделях атмосферы получило использование свободно распространяемой параметризации коротко- и длинноволновой радиации RRTMG SW и LW соответственно [17, 24], в которой фактически используется интерполяция данных, полученных при расчете всех линий поглощения с учетом фактической температуры и давления. Отдельно рассматривается 14 спектральных интервалов для коротковолновой радиации и 16 для длинноволновой. Показано, что при этом погрешность по отношению к полинейным расчетам не превышает 3 Вт/м^2 для коротковолновой компоненты и 1 Вт/м^2 для длинноволновой в случае

ясного неба [17]. Такие параметризации применяются в моделях прогноза погоды Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП), американских Национальных центров прогнозов окружающей среды (NCEP), американской региональной модели WRF-ARW, немецкой модели ICON, китайской модели GRAPES, а также климатических моделях Национального центра атмосферных исследований США (NCAR), ECHAM (Германия), LMD (Франция). Недавно длинноволновая компонента RRTMG реализована в отечественной глобальной модели ПЛИАВ [6].

Для учета облачности в последнее время применяют подход со стохастическим распределением облачности. Вместо одного расчета с частичным покрытием облачностью ячейки горизонтальной сетки модели на каждом вертикальном уровне, выполняется несколько расчетов с профилями бинарной облачности (ясное небо/полное покрытие), которые построены таким образом, чтобы при усреднении профилей бинарной облачности получался бы заданный профиль с частичным покрытием [27]. Такой подход заметно дороже, но качество модельного климата при этом получается выше. Вообще, наибольшая неопределенность в моделях атмосферы связана именно с описанием процессов в облаках.

Образование крупномасштабных осадков. За последнее десятилетие многие прогностические центры внедрили схемы образования и трансформации крупномасштабных осадков с учетом микрофизических процессов (например, процесс Бергерона-Фендайзена) и переноса образовавшихся осадков. Такие схемы достаточно точно учитывают фазу осадков в момент их образования и ее изменения по мере движения к поверхности Земли. Эти схемы также допускают (как и в природе) сосуществование капель и кристаллов в конденсате. Они применяются в большинстве прогностических моделей атмосферы: ЕЦСПП, метеослужба Германии, Метео-Франс, WRF, полулагранжева модель Гидрометцентра и другие (см., например, [14, 22, 24]).

Пограничный слой атмосферы. По мере роста вычислительных возможностей, параметризация пограничного слоя во многих моделях значительно усложнилась. Применяются подходы с включением дополнительного уравнения кинетической энергии турбулентности в различных вариантах (в частности, с уравнением

переноса этой величины) [10], также применяются и гораздо более сложные параметризации, учитывающие т. н. моменты третьего порядка [7]. Развивается и альтернативный подход EDMF (eddy diffusivity – mass flux [40]). Для сравнения различных подходов уже много лет выполняется международный проект GABLS (GEWEX atmospheric boundary layer study) [<http://www4.ncsu.edu/~sbasu5/GABLS3/>], в котором результаты воспроизведения пограничного слоя различными параметризациями сравниваются как с данными наблюдений, так и с результатами трехмерного моделирования моделями крупных вихрей (large eddy simulation, LES). Особый акцент в этих исследованиях делается на воспроизведении устойчивого пограничного слоя.

3. Современное состояние глобальных моделей атмосферы

3.1. Модели численного прогноза погоды

В настоящее время ведущие прогностические центры используют для глобального среднесрочного прогноза численные гидродинамические модели с горизонтальным разрешением 13–30 км. В табл. 1 приведены данные о характеристиках вычислительных систем и глобальных моделей среднесрочного прогноза погоды, применяемых по состоянию на 01 января 2015 года в мире по данным Рабочей группы по численному экспериментированию Всемирной метеорологической организации (WGNE WMO) [https://www.wmo.int/pages/about/sec/rescrosscut/documents/wgne_table_2015_v4.xls].

Информация о текущем разрешении этих моделей и применяемых параллельных вычислительных системах приведена в табл. 1 в правом и левом столбцах соответственно. Подавляющее большинство моделей (исключения – немецкая, бразильская, индийская и одна из российских моделей) используют полулагранжево представление адвекции и полуявную схему интегрирования по времени. Спектральные модели имеют букву T в обозначении разрешения, последующие цифры означают количество сферических гармоник. Цифры после буквы L обозначают количество вертикальных уровней. Отметим, что за 5 последних лет в мире стало на 2 спектральные модели меньше (Австралия, Корея).

Таблица 1

**Характеристики вычислительных систем и глобальных моделей
среднесрочного прогноза погоды по состоянию на 01 января 2015 года**

Forecast Centre (Country)	Computer (Sustained in TFlop/s)	High resolution Model (FC Range in days)
ECMWF (Europe)	Cray XC30, 3400 nodes x 2 (2 x ~140)	T _L 1279 L137 (10)
Met Office (UK)	IBM P775 480+576+160 nodes (~50)	~17 km L70 (6)
Météo France (France)	BULL Intel Ivy Br. (1008 + 990 nodes) (2x24)	T _L 798(C2.4) L70 (4)
DWD (Germany)	Cray XC30; 2x17.648 cores (2x25)	13 km L90 (7.5)
HMC (Russia)	RSC Tornado, 96 nodes x 16 cores, SGI ICE-X, 36 nodes x 20 cores, (4.5,4.3)	0.72°x0.9° L28 (10) T339 L31 (10)
NCEP (USA)	IBM p655 (Cluster 1600) (2x1.9)	T878 L64 (7.5) T190 L64 (16)
Navy/FNMOC/NRL (USA)	Dell Xeon (450+90+120 nodes)	T359L50 7,5
CMC (Canada)	IBM P7, 2 x 256 nodes x 32 cores (2x15)	0.35°x0.23° L80 (10)
CPTEC/INPE (Brazil)	CRAY XT6 30528 cores (16.6)	T299 L64 (7); T126 L28 Coupled (30)
JMA (Japan)	Hitachi SR16000-M1, 2*432 nodes (2x30)	TL959 L100 (11)
CMA (China)	IBM p7, 560 nodes x 32 cores	TL639 L60 (10)
KMA (Korea)	Cray XE6 90240 cores (2x13)	~25km L70 (12)
NCMRWF (India)	IBM P6 - 1280 processor (2.4)	T574L64 (10)
BoM (Australia)	Oracle Blade 6000, 576 nodes (12 cores per node) (5)	40km, L70 (10)

Примечание: T – спектральная эйлера модель с квадратичной сеткой; TL – спектральная полулагранжева модель с линейной сеткой; TCo - спектральная полулагранжева модель с кубической сеткой; последующие цифры указывают на количество гармоник. Цифры после буквы L – количество вертикальных уровней.

Из таблицы видно, что всего в мире существует 15 глобальных моделей, однако лишь 8 из них являются самостоятельно разработанными. Например, Корея (КМА) и Австралия (BoM) используют модель английской метеослужбы, Индия и Бразилия используют американскую модель GFS, разработанную в NCEP. Китай (CMA) пока использует раннюю версию модели Европейского центра среднесрочных прогнозов, внедрение модели собственной разработки планируется в 2016 году. Небольшое количество глобальных моделей в мире связано с большими усилиями, необходимыми для их разработки и развития, а также с большими вычислительными ресурсами, необходимыми для их эксплуатации.

Несомненным лидером среди глобальных моделей среднесрочного прогноза погоды является модель Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП – ECMWF). Эта модель – спектральная полулагранжева с двухслойной полунеявной схемой интегрирования по времени. В [18] приводятся оценки эффективности этой модели: если бы она осталась эйлеровой полунеявной моделью с трехслойной схемой по времени, то прогноз на одни сутки выполнялся бы на той же вычислительной системе в десять раз медленнее (коэффициент 5 – за счет большого шага по времени в полулагранжевом методе, коэффициент 2 – за счет применения двухслойной схемы по времени вместо трехслойной схемы «чехарда»). В настоящее время эта модель имеет разрешение T_L1279 (примерно 16 км), вертикальное – 137 уровень. (T_L означает «линейную» сетку, ее число узлов по долготе связано со спектральным усечением N как $2N + 1$. Ее применение возможно только в сочетании с полулагранжевой адвекцией [18]).

В настоящее время оперативная модель использует 1536 процессорных ядер. Эффективность использования этого количества ядер моделью составляет более 80 %. Такая высокая эффективность достигнута в том числе за счет сочетания технологий распараллеливания MPI и OpenMP (в оперативном режиме применяется 16 нитей OpenMP) [33].

В американском Национальном центре прогнозов окружающей среды (NCEP) применяется спектральная полулагранжева модель GFS с полунеявной схемой интегрирования по времени [30]. В настоящее время разрешение этой модели составляет примерно 13 км (T878), 64 вертикальных уровня.

Более подробные описания глобальных прогностических моделей ведущих метеослужб приведены в [42] для модели Англии, в [32] для Канады, в [9] для Франции и в [46, 52] для Германии.

Анализ левого столбца табл. 1 говорит о том, что все прогностические центры применяют массивно-параллельные системы. Часто эти системы состоят из двух одинаковых частей по соображениям надежности. Интересно отметить, что в табл. 1 приведены не пиковые производительности соответствующих вычислительных систем, а реально достигнутые.

Для измерений используется одновременный запуск нескольких копий моделей (применяемый в оперативной практике для расчета ансамблевого вероятностного прогноза). Как видно, реально достигнутые показатели производительности не кодах моделей прогнозы погоды составляет лишь несколько процентов от пиковой. Видно, что ведущие прогностические центры используют в оперативной работе несколько тысяч процессорных ядер для одной задачи. Таких задач, решаемых одновременно, на самом деле больше – все центры также рассчитывают оперативный вероятностный ансамблевый среднесрочный и долгосрочные прогнозы. В итоге, масштабируемость программного комплекса современной модели прогноза погоды должна быть никак не хуже нескольких тысяч ядер.

3.2. Глобальные модели атмосферы для изучения изменений климата

В рамках программы сравнения совместных моделей климатической системы CMIP3 модели атмосферы имели разрешение около 250 км, а за последующие семь лет среднее разрешение моделей в проекте CMIP5 увеличилось до 150 км в атмосфере. Это связано, во-первых, с тем, что модели атмосферы здесь являются лишь частью гораздо более сложной (в том числе и вычислительно) модели Земной системы, во-вторых, с необходимостью массовых расчетов с данными моделями (различные сценарии и протоколы экспериментов). В экспериментах с моделью атмосферы при некоторых постановках численных экспериментов эти модели применялись при горизонтальном разрешении до $0,25^\circ$ [20, 21].

Климатическая модель атмосферы Национального центра атмосферных исследований (NCAR) CAM5 является составной частью совместной модели Земной системы CESM1. Модель является свободно распространяемой. Подробное описание модели приведено в [11]. Модель включает в себя 4 различных блока решения уравнений динамики атмосферы: конечно-объемный эйлеров по горизонтали, лагранжев по вертикали на «обычной» широтно-долготной сетке; блок с использованием спектральных элементов на кубической сфере, а также разработанные много лет назад спектральный эйлеров и конечно-разностный полулагранжев. Спектральный блок масштабируется лишь на нескольких сотнях процессоров, конечно-объемный блок масштабируется на несколько тысяч, а блок на основе метода спектральных элементов масштабируется лучше всех [10], вплоть до многих десятков тысяч процессоров. Именно с этим блоком ведутся опытные расчеты изменений климата с шагом сетки по горизонтали порядка 25 км. Модель включает в себя блок атмосферной химии, учитывающий основные процессы, связанные с малыми газовыми составляющими и аэрозолями, блок описания микрофизических процессов в облаках.

Климатическая модель атмосферы Лаборатории геофизической гидродинамики США (GFDL) AM3 является компонентой модели Земной системы этой лаборатории. Ее подробное описание приведено в [12]. Динамический блок этой модели использует сетку кубической сферы, как и модель NCAR. Достигнуто хорошее масштабирование кода модели на массивно-параллельных вычислительных системах. Модель включает детальное описание переноса и химических реакций между 85 малыми газовыми составляющими, а также описание 20 компонент аэрозолей. Важной особенностью этой модели является учет взаимодействий между аэрозолями и облаками. В частности, аэрозоли учитываются в процессе образования капель в облаке.

4. Планы развития глобальных моделей

В последние годы глобальные модели атмосферы развиваются по следующим направлениям.

Во-первых, происходит постепенное стирание границ между моделями, предназначенными для численного прогноза погоды, и

моделями, предназначенными для моделирования изменений климата. В рамках этого процесса модели обогащаются новыми либо усовершенствованными параметризациями процессов подсеточного масштаба. Во-вторых, в ряде ведущих центров осуществляются проекты по замене блоков решения уравнений динамики атмосферы (разрешаемой явно на данной сетке). В рамках этих проектов также реализуется программная инфраструктура моделей, способная адаптироваться к перспективным архитектурам вычислительных систем.

Действительно, в атмосфере не существует искусственных временных границ, разделяющих мезомасштабные, синоптические, сезонные и межгодовые масштабы. Глобальная модель атмосферы, ориентированная на прогноз в некотором временном диапазоне, должна воспроизводить процессы всех временных масштабов. В этом заключается идея бесшовного прогноза, впервые сформулированная в 2005 году [35]. Часто это влечет за собой необходимость подключения к модели атмосферы новых моделей-компонент 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 совместные модели атмосферы, океана, морского льда для среднесрочного прогноза погоды (см. табл. 2). Отметим, что развитие систем бесшовного прогноза в настоящее время является одной из главных задач Всемирной метеорологической организации [35].

Стирание граници между моделями прогноза погоды и моделями климата означает, среди прочего, что в модели прогноза погоды постепенно включают блоки переноса и трансформации (химических реакций, осаднения, коагуляции и т.д.) малых газовых составляющих и аэрозолей. Климатические модели, в свою очередь, включают параметризации процессов подсеточного масштаба, которые ранее считались важными лишь для краткосрочного прогноза погоды. Например, в климатическую модель атмосферы CAM5 (Community Atmospheric Model), развиваемую консорциумом во главе с Национальным центром атмосферных исследований США (эта модель является частью совместной модели Земной

системы CESM1), включают продвинутую параметризацию микрофизических процессов в облаках с прогностической концентрацией дождевых капель и снежинок, планируется усовершенствование параметризации торможения гравитационных волн в атмосфере. Такие параметризации широко и достаточно давно применяются в моделях численного прогноза погоды.

Отметим, что пионером в использовании одной и той же модели, как для численного прогноза погоды, так и для моделирования изменений климата, является, несомненно, метеослужба Великобритании (UK MetOffice). Разработанная в этой службе унифицированная модель (unified model, UM) начала применяться в 1990 году.

В табл. 2 приводятся планы развития глобальных прогностических систем по данным того же источника, что и табл. 1. Мы видим, что большинство центров планирует повысить горизонтальное и вертикальное разрешение используемых моделей в ближайшие годы. Некоторые центры планируют использовать в оперативной практике совместные модели атмосферы, океана и морского льда даже для среднесрочного прогноза погоды. Это потребует повышения производительности применяемых вычислительных систем примерно на порядок. Крайне важным вопросом при этом является эффективное использование таких массивно-параллельных систем.

В связи с этим в ряде ведущих центров начались работы по созданию перспективных глобальных моделей, чьи программные комплексы могли бы масштабироваться на десятки и сотни тысяч процессорных ядер. В немецкой метеослужбе такой проект был успешно завершен в 2014 году: была реализована глобальная негидростатическая модель на треугольной сетке ICON [46, 52]. Показано, что программный комплекс ICON масштабируется вплоть до 96000 процессорных ядер.

В метеослужбе Великобритании (UK MetOffice) в 2011 году стартовал проект GUNGHU – Global UNstructured Grid Highly Optimized по разработке динамического блока нового поколения [42]. После обширного тестирования различных вариантов сеток и пространственных аппроксимаций для дальнейшей реализации был выбран метод смешанных (миметических) конечных элементов на треугольной сетке [44].

Таблица 2

Планы развития глобальных прогностических систем (разрешение по горизонтали и вертикали, количество вертикальных уровней)

Forecast Centre (Country)	2015	2016	2017	2018	2019
ECMWF	TL1279 L137 (16km)	TCo1279 L137 (~9km)	TCo1279 L137 (~9km)	TBD	TBD
Met Office (UK)	17km L70 6 days	17km L70 7 days?	10/12km L70 7 days?	10/12km L70/L120-200 7 days	Coupled O-A 10/12km L120-200 7days
Météo France (France)	TL1198c2.2 L105 (8km on W Europe)	TL1198c2.2 L105 (8km on W Europe)	~TL1618c2.4 L105 (5km on W Europe)	~TL1618c2.4 L105 (5km on W Europe)	~TL1618c2.4 L105 (5km on W Europe)
DWD (Germany)	13 km L90 (6.5km in Europe)	13 km L90 (6.5km in Europe)			
HMC (Russia)	0.18°x0.225° L51 T339 L31	0.18°x0.225° L51 T339 L63	0.18°x0.225° L60 T339 L63	0.18°x0.225° L60 T339 L63	
NCEP (USA)	13km 64		13km 128		

Navy/FNNOC/NRL (USA)	T425L60	T681L80			
CMC (Canada)	Yin-Yang (0.23°x0.23°) L80	Yin-Yang (0.14°x0.14°) L120	Yin-Yang (0.14°x0.14°) L120	Yin-Yang (0.09°x0.09°) L120	Yin-Yang (0.09°x0.09°) L160
CPTEC/INPE (Brazil)	TQ666 L64 (20 km), 7 days	10km L64, 7 days	Coupled O-A 20km L64, 10 days	Coupled O-A 10/20km L96, 10 days	Coupled O-A 10/20km L96, 10 days
JMA (Japan)	TL959 L100	TL959 L100	TL959 L100		
CMA (China)	GRAPES(0.25°, L60)	GRAPES(0.25°, L90)			
KMA (Korea)	25km L70	17kmL70	17kmL70	17kmL70	12km L110
BoM (Australia)	25 km L70	25 km L70	12 km L70	12 km L70	12 km L120

Примечание: Т – спектральная эйлера модель с квадратичной сеткой;

TL – спектральная полулагранжева модель с линейной сеткой;

TCo - спектральная полулагранжева модель с кубической сеткой; последующие цифры указывают на количество гармоник. Цифры после буквы L – количество вертикальных уровней.

В рамках проекта значительные усилия прилагаются и к эффективной программной реализации этого блока (подпроект LfRic). Целью проекта является реализация к 2020 г. в оперативном режиме модели, которая бы, в отличие от нынешней версии модели, сохраняла массу переносимых субстанций и позволяла использование до 100000 процессорных ядер.

Схожие цели преследует и американский проект разработки глобальной модели атмосферы нового поколения (New Generation Global Prediction System, NGGPS) стартовавший в январе 2015 года [31] под руководством Национальной метеорологической службы (NWS). Согласно [31], проект посвящен разработке и внедрению Глобальной системы прогнозирования следующего поколения (NGGPS), которая будет легко приспособливаема и масштабируема при развитии архитектуры высокопроизводительных вычислительных систем (HPC). Конечной целью разработки NGGPS декларируется повышение полезной заблаговременности прогноза до 30 дней, а также создание инфраструктуры для развития системы прогноза в течение следующих нескольких десятилетий. Исследования и разработки ведутся в сотрудничестве с лабораториями Национальной администрации по атмосфере и океану (NOAA), Национальным центром атмосферных исследований (NCAR), а также университетским научным сообществом. Текущая оперативная Глобальная Система Прогноза (GFS) в США основана на Глобальной Спектральной Модели (GSM). Ее динамический блок имеет известные ограничения по масштабируемости и адаптируемости к будущим архитектурам вычислительных систем. Будущая система NGGPS потребует блока решения уравнений динамики атмосферы (т. н. динамического ядра – *dsoge*), который будет негидростатическим, хорошо масштабируемым и архитектурно совместимым с будущими вычислительными системами. В настоящее время в проекте рассматриваются шесть динамических ядер, разработанных участниками проекта. Среди кандидатов, в частности, динамический блок модели MPAS [38]. Выработан протокол тестирования этих блоков (<http://www.nws.noaa.gov/ost/nggps/implementation.html>).

В Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды также озабочены ограничениями на масштабируемость программного

комплекса модели, которые налагает применение спектрального метода решения уравнений динамики атмосферы в силу необходимости одновременной пересылки данных между всеми процессорами (т. н. глобальные коммуникации). В докладах А. Торпа (открытая конференция ВПМИ ВМО), Н. Веди и других сотрудников этого центра в 2014 году приводился любопытный факт: для модели с горизонтальным разрешением порядка 1 км, использующей около 100000 процессов MPI, время выполнения одной такой пересылки примерно равно предельному времени, которое модель может затратить на выполнение всего шага по времени исходя из требований оперативности. В этой связи в ближайшей версии модели ЕЦСПП решено повысить разрешение сетки по горизонтали в два раза без повышения спектрального разрешения (т. н. кубическая сетка, для которой число узлов сетки по кругу широты равно $4N+1$, где N – число гармоник). Численные эксперименты показали, что при этом качество прогноза все равно улучшается [47]. В Европейском центре среднесрочных прогнозов разработан экспериментальный конечно-объемный модуль решения негидростатических уравнений динамики, позволяющий использовать произвольную неструктурированную сетку [48]. Одной из задач при разработке этого модуля являлась определенная совместимость с существующей структурой программного комплекса модели ЕЦСПП. Выполнены первые академические тесты, результаты представлены в [48].

Заключение

После более чем двух десятилетий интенсивного развития методов и технологий усвоения данных наблюдений, позволивших значительно уменьшить ошибку численного прогноза погоды при неизменной модели атмосферы [3], в мире вернулись к столь же интенсивному развитию глобальных моделей атмосферы. Основной причиной этого послужило осознание невозможности дальнейшего уменьшения ошибок прогноза без повышения разрешения моделей и дальнейшего усложнения описания процессов подсеточного масштаба. На пути повышения разрешения встало инфраструктурное препятствие: невозможность эффективного использо-

вания перспективных массивно параллельных вычислительных систем в силу использовавшегося во многих моделях спектрального метода и/или недостаточно масштабируемых вычислительных алгоритмов и их программной реализации. На основании рассмотренного зарубежного опыта можно сделать вывод, что все ведущие центры вложили либо вкладывают существенные ресурсы в преодоление вышеуказанного препятствия. В России в Институте вычислительной математики РАН и Гидрометцентре России также ведутся работы по созданию масштабируемого динамического ядра нового поколения для глобальной оперативной модели атмосферы ПЛАВ [4].

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-27-00126) в Институте вычислительной математики РАН.

Список использованных источников

1. *Марчук Г.И.* Численные методы в прогнозе погоды. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 353 с.

2. *Робер А.* Полууневный метод // Численные методы, используемые в атмосферных моделях. Т. 2: пер. с англ. / под ред. В.П. Садокова. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – С. 302–315.

3. *Толстых М.А., Фролов А.В.* Некоторые современные проблемы численного прогноза погоды // Известия РАН. ФАО. – 2005. – Т. 41. – С. 315–327.

4. *Толстых М.А.* Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. – М; Обнинск: ОАО ФОР, 2010. – 111 с.

5. *Толстых М.А., Ибраев Р.А., Володин Е.М., Ушаков К.В., Калмыков В.В., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Хабеев Р.Н.* Модели глобальной атмосферы и Мирового океана: алгоритмы и суперкомпьютерные технологии: учебное пособие. Серия «Суперкомпьютерное образование». – М.: Изд-во МГУ, 2013. – 144 с.

6. *Толстых М.А., Желен Ж.Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Красюк Т.В., Кострыкин С.В., Мизяк В.Г., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Шляева А.В., Эзау И.Н., Юрова А.Ю.* Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 6. – С. 25–35.

7. Bařtak Ďuran I., Geleyn J.-F., Vana F.A. Compact Model for the Stability Dependency of TKE Production–Destruction–Conversion Terms Valid for the Whole Range of Richardson Numbers // *J. Atmos. Sci.* – 2014. – Vol. 71. – P. 3004–3026.

8. Benard P., Vivoda J., Masek J., Smolikova P., Yessad K., Smith Ch., Brozkova R., Geleyn J.-F. Dynamical kernel of the Aladin NH spectral limited-area model: Revised formulation and sensitivity experiments // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* – 2010. – Vol. 136. – P. 155–169.

9. Courtier P., Freyrier C., Geleyn J.-F., Rabier F., Rochas M. The AR-PEGE project at Meteo-France // *Procs. of the ECMWF seminar on numerical methods in atmospheric models* – 1991. – Reading, UK: 1992. – Vol. 2. – P. 192–208.

10. Dennis J.M., Vertenstein M., Worley P.H., Mirin A.A., Craig A.P., Jacob R., Mickelson S.A. Computational performance of ultra-high-resolution capability in the community earth system model // *International Journal for High Performance Computer Applications.* – 2012. – Vol. 26. – P. 5–16.

11. *Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 5.0)* NCAR TECHNICAL NOTE NCAR/TN-486+STR. June 2010. – http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.2/cam/docs/description/cam5_desc.pdf

12. Donner L., Wyman B.L., Hemler R.S., Horowitz L.W., Yi Ming, Ming Zhao, Golaz J.-C., Ginoux P., Lin S.-J., Schwarzkopf M.D. et al. The dynamical core, physical parameterizations, and basic simulation characteristics of the atmospheric component AM3 of the GFDL Global Coupled Model CM3 // *J. Climate.* – 2011. – Vol. 24. – P. 3484–3519.

13. Gassmann A. A global hexagonal C-grid non-hydrostatic dynamical core (ICON-IAP) designed for energetic consistency // *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* – 2013. – Vol. 139. – P. 152–175.

14. Gerard L., Piriou J.-M., Brozkova R., Geleyn J.-F., Banciu D. Cloud and Precipitation Parameterization in a Meso-Gamma-Scale Operational Weather Prediction Model // *Mon. Wea. Rev.* – 2009. – Vol. 137. – P. 3960–3977.

15. Girard C., Benoit R., Desgagne M. Finescale topography and the MC2 dynamics kernel // *Mon. Weather Rev.* – 2005. – Vol. 133. – P. 1463–1477.

16. Yu M.L., Giraldo F.X., Peng M., Wang Z.J. Localized artificial viscosity stabilization of discontinuous Galerkin methods for nonhydrostatic mesoscale atmospheric modeling // *Mon. Weather Rev.* – 2015. – Vol. 143. – P. 4823–4845.

17. Hortal M., Simmons A.J. Use of reduced Gaussian grids in spectral models // *Mon. Wea. Rev.* – 1991. – Vol. 119. – P. 1057–1074.

18. *Hortal M.* Aspects of the numerics of the ECMWF model // Recent developments in numerical methods for atmospheric modelling. – Procs. of the ECMWF Seminar 7–11 September 1998. – Reading, UK: 1999. – P. 50.

19. *Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D.* Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models // *J. Geophys. Res.* – 2008. – Vol. 113. – P. D13103.

20. *Jung T., Miller M.J., Palmer T.N. et al.* High-resolution global climate simulations with the ECMWF model in Project Athena: Experimental design, model climate, and seasonal forecast skill // *J. Climate.* – 2012. – Vol. 25, No. 9. – P. 3155–3172.

21. *Kendon E.J., Roberts N.M. Senior C.A., Roberts M.J.* Realism of rainfall in a very high-resolution regional climate mode // *J. Clim.* – 2012. – Vol. 25, No. 17. – P. 5791–5806.

22. *Khvorostyanov V., Sassen, K.* Cirrus cloud simulation using explicit microphysics and radiation. part ii: Microphysics, vapor and ice mass budgets, and optical and radiative properties // *J. Atmos. Sci.* – 1998. – Vol. 55. – P. 1822–1845.

23. *Lauritzen P.H., Nair R.D., Ullrich P.A.* A conservative semi-Lagrangian multi-tracer transport scheme (CSLAM) on the cubed-sphere grid // *J. Comput. Phys.* – 2010. – Vol. 229. – P. 1401–1424.

24. *Lopez Ph.* Implementation and validation of a new prognostic large-scale cloud and precipitation scheme for climate and data assimilation purposes // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* – 2002. – Vol. 128. – P. 229–258.

25. *Machenhauer B.* Spectral Methods // ECMWF Seminar on Numerical Methods in Atmospheric Models, 9–13 September 1991. – 1992. <http://www.ecmwf.int/publications/library/do/references/show?id=87596>

26. *Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J., Clough S.A.* RRTM, a validated correlated-k model for the longwave // *J. Geophys. Res.* – 1997. – Vol. 102. – P. 16.663-16.682.

27. *Morcrette J.-J., Barker H.W., Cole J.N.S., Iacono M.J., Pincus R.* Impact of a new radiation package, McRad, in the ECMWF Integrated Forecast System // *Mon. Wea. Rev.* – 2008. – Vol. 136. – P. 4773–4798.

28. *Müller E.H., Scheichl R.* Massively parallel solvers for elliptic partial differential equation in numerical weather and climate prediction // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* – 2014. – Vol. 140. – P. 2608–2624.

29. *Nair R., Choi H.-W., Tufö H.M.* Computational aspects of a scalable high-order dis-continuous Galerkin atmospheric dynamical core // *Computer & Fluids.* – 2009. – Vol. 38. – P. 309–319.

30. *NCEP GFS.* – <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html>

31. *Next Generation Global Prediction System (NGGPS)*. – <http://www.nws.noaa.gov/ost/nggps>
32. *Qaddouri A., Lee V.* The Canadian Global Environmental Multiscale model on the Yin-Yang grid system // *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* – 2011. – Vol. 137. – P. 1913–1926.
33. *Salmond D., Hamrud M.* IFS scalability and computational efficiency // 14th ECMWF Workshop on Use of High Performance Computing in Meteorology, 1–5 November 2010. – http://www.ecmwf.int/newsevents/meetings/workshops/2010/high_performance_computing_14th/presentations/Salmond_Hamrud.pdf
34. *Satoh M., Tomita H., Yashiro H., Miura H., Kodama C., Seiki T., Noda A. T., Yamada Y., Goto D., Sawada M., Miyoshi T., Niwa Y., Hara M., Ohno T., Iga S.-I., Arakawa T., Inoue T., Kubokawa H.* The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development // *Progress in Earth and Planetary Science*. – 2014. – Vol. 1. – P. 1–18.
35. *Seamless prediction of the earth system: from minutes to months* // WMO-No.1156. – June 2015. – http://library.wmo.int/opac/index.php?lvl=notice_display&id=17276
36. *Shashkin V.V., Tolstykh M.A.* Inherently mass-conservative version of the semi-Lagrangian absolute vorticity (SL-AV) atmospheric model dynamical core // *Geosci. Model Dev.* – 2014. – Vol. 7. – P. 407–417.
37. *Skamarock W.* Global Atmospheric Solvers for Next-Generation Weather and Climate Models http://www2.mmm.ucar.edu/projects/global_cores/global_core.html
38. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Duda M.G., Fowler L.D., Park S.-H., Ringler T.D.* A Multiscale Nonhydrostatic Atmospheric Model Using Centroidal Voronoi Tessellations and C-Grid Staggering // *Mon. Wea. Rev.* – 2012. – Vol. 140. – P. 3090–3105.
39. *Smolarkiewicz P.K., Deconinck W., Hamrud M., Kühnlein C., Mozdzyński G., Szmelter J., Wedi. N.P.* A finite-volume module for simulating global all-scale atmospheric flows // *J. Comput. Phys.* – 2015, submitted.
40. *Soares P.M.M., Miranda P.M.A., Siebesma A.P., Teixeira J.* An Eddy-Diffusivity/Mass-flux parameterization for dry and shallow cumulus convection // *Q.J. Roy. Meteor. Soc.* – 2004. – Vol. 130. – P. 3365–3384.
41. *Staniforth A., Côté J.* Semi-Lagrangian integration schemes for atmospheric models. A review // *Mon. Weather Rev.* – 1991. – Vol. 119. – P. 2206–2223.
42. *Staniforth A., Melvin T., GungHo Wood. N.* A new dynamical core for the Unified Model // ECMWF Seminar on Numerical Methods for Atmosphere and Ocean Modelling, 2-5 September 2013, ECMWF, Reading, UK. – 2014. – P. 15–30.

43. *Taylor M., Tribbia J., Iskandarani M.* The spectral element method for the shallow water equations on the sphere // *J. Comput. Phys.* – 1997. – Vol. 130. – P. 92–108.

44. *Thuburn J., Cotter C.J.* A primal-dual mimetic finite element scheme for the rotating shallow water equations on polygonal spherical meshes // *J. Comput. Phys.* – 2015. – Vol. 290. – P. 274–297.

45. *Tyberg M.* Fast algorithms for spherical harmonic expansions, III // *J. Comput. Phys.* – 2010. – Vol. 229. – P. 6181–6192.

46. *Wan H., Giorgetta M. A., Zängl G., Restelli M., Majewski D., Bonaventura L., Fröhlich K., Reinert D., Rípodas P., Kornbluh L., Förstner J.* The ICON-1.2 hydrostatic atmospheric dynamical core on triangular grids. Part 1: Formulation and performance of the baseline version // *Geosci. Model Dev.* – 2013. – Vol. 6. – P. 735–763.

47. *Wedi N.P.* Increasing horizontal resolution in numerical weather prediction and climate simulations: illusion or panacea? // *Phil. Trans. Roy. Soc. A.* – 2014. – Vol. 372. – P. 20130289.

48. *Wedi N.P., Bauer P., Deconinck W., Diamantakis M., Hamrud M., Kühnlein C., Malardel S., Mogensen K., Mozdzyński G., Smolarkiewicz P.K.* The modelling infrastructure of the Integrated Forecasting System: Recent advances and future Challenges // *Tech. Memo.* – 2015. – Vol. 760. – ECMWF, Reading UK. – 50 p.

49. *Wehner M.F., Reed K.A., Li F., Prabhat, Bacmeister J., Chen C.-T., Paciork C., Cleckler P.J., Sperber K.R., Collins W.D., Gettelman A., Jablonowski C.* The effect of horizontal resolution on simulation quality in the Community Atmospheric Mode, CAM5.1 // *J. Adv. Model. Earth Syst.* – 2014. – Vol. 6. – P. 980–997.

50. *White J.B. III, Dongarra J.J.* High-performance high-resolution tracer transport on a sphere // *J. Comput. Phys.* – 2011. – Vol. 230. – P. 6778–6799.

51. <http://apps.ecmwf.int/wmolednv/>

52. *Zängl G., Reinert D., Rípodas P., Baldauf M.* The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core // *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* – 2015. – Vol. 141. – P. 563–579.

53. *Zerroukat M., Wood N., Staniforth A.* SLICE-S: A semi-Lagrangian inherently conserving and efficient scheme for transport problems on the sphere // *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* – 2004. – Vol. 130. – P. 2649–2664.

Поступила в редакцию 2.02.2016 г.