

## Параллельная реализация совместной модели атмосферы и океана для бесшовного прогноза погоды и моделирования изменений климата\*

Р.Ю. Фадеев<sup>1</sup>, К.В.Ушаков<sup>2,1</sup>, М.А. Толстых<sup>1,3</sup>, Р.А.Ибраев<sup>1,2,3</sup>, В.В.Калмыков<sup>2</sup>

Институт вычислительной математики РАН<sup>1</sup>, Институт океанологии РАН<sup>2</sup>,  
Гидрометцентр России<sup>3</sup>

Совместные модели атмосферы, океана и морского льда широко применяются в моделировании изменений климата. В настоящее время все более очевидна необходимость применения таких моделей в прогнозе погоды на различных временных масштабах. В работе обсуждаются особенности программной реализации перспективной совместной модели, разработанной в ИВМ РАН, ИО им. П.П. Ширшова РАН и Гидрометцентре России. Модели атмосферы ПЛАВ, Мирового океана ИВМИО и морского льда объединены с помощью каплера - оригинальной компактной вычислительной платформы для моделирования СМФ. Особенность СМФ заключается в использовании абстрактных интерфейсов. Поэтому головная программа и каплер не зависят от количества подключаемых моделей. Для организации взаимодействия с другими компонентами достаточно запрограммировать дополнительный производный тип, не внося существенных изменений в код самой модели. Результаты численных экспериментов с совместной моделью демонстрируют согласие с данными наблюдений и возможность ее использования для вероятностного прогноза погоды на масштабах от недель до года.

*Ключевые слова:* совместные модели атмосферы, океана и морского льда, глобальная модель атмосферы, численный прогноз погоды, моделирование изменений климата

### 1. Введение

Концепция бесшовного прогноза состояния атмосферы [1] 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 воспроизведения каких-либо временных масштабов, должна адекватно воспроизводить процессы всех временных масштабов. 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.).

Совместные модели атмосферы, океана и морского льда ранее применялись, в основном, в моделировании изменений климата, однако в настоящее время такие модели используются и в прогнозе погоды на различных временных масштабах. Например, в работе [2] отмечена важность применения совместной модели океана и льда для краткосрочного прогноза погоды на восточном побережье Канады. Следует отметить, что за пределами синоптической предсказуемости (5-7 дней) мы можем говорить лишь о вероятностном прогнозе осредненных аномалий погоды по отношению к климату.

Во многих метеорологических центрах разработаны и реализованы системы долгосрочного прогноза на основе совместных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (например, [3]). Объектом прогноза при этом являются среднесезонные аномалии метеорологических по-

---

\* Раздел 2 выполнен в ИВМ РАН, раздел 3 выполнен в ИО им. П.П. Ширшова РАН при поддержке Программы Президиума РАН I.33П «Фундаментальные проблемы математического моделирования». Разделы 4-5 выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект N 14-27-00126) в ИВМ РАН.

лей по отношению к среднеклиматическим значениям для данного сезона. Типичное пространственное разрешение компонентов такой системы сезонного прогноза, обычно, составляет 0,3-1,9° по горизонтали и 30-70 уровней по вертикали для модели атмосферы и 0,25-1° по долготе и широте и около 30 уровней по вертикали для модели океана. Прогноз среднесезонных аномалий температуры и осадков в силу атмосферной синоптической изменчивости является, по сути, попыткой выделить слабый сигнал на уровне сильного шума. Стандартным подходом при решении таких задач является расчет ансамбля сезонных прогнозов с возмущенных начальных данных. Характерное количество прогностических реализаций ансамбля составляет 10-60.

Совместная модель модели атмосферы, океана, деятельного слоя суши и морского льда предполагает объединение отдельно разрабатываемых компонент в единый программный комплекс с отдельным сервисным элементом, основной функцией которого является организация взаимодействия и обмена данными между компонентами, синхронизация времени, а также, в некоторых случаях, работа с файловой системой. В силу огромных вычислительных затрат, каждый компонент в отдельности и совместная модель в целом должны быть не только вычислительно эффективны с точки зрения количества арифметических операций, но и обладать хорошей масштабируемостью.

В настоящей работе обсуждаются особенности технической реализации и первые результаты численных экспериментов с перспективной совместной моделью, разработанной в ИВМ РАН, ИО им. П.П.Ширшова РАН и Гидрометцентре России. Основными компонентами здесь являются: модель атмосферы ПЛАВ [4] (краткое описание приводится в разделе 2), модель Мирового океана ИВМИО [5] (раздел 3) и компактная вычислительная платформа для моделирования CMF 2.0 [6, 7] (раздел 4), которая обеспечивает одновременную работу каждого компонента, обмен данными между ними и работу с файловой системой. В разделе 5 обсуждаются первые результаты моделирования в совместном режиме.

## 2. Глобальная модель атмосферы ПЛАВ

Глобальная полулагранжева модель общей циркуляции атмосферы ПЛАВ (ПолуЛагранжева, основанная на уравнении Абсолютной завихренности) [4], разработана в ИВМ РАН и Гидрометцентре России. Модель ПЛАВ применяется в Гидрометцентре России для оперативного среднесрочного прогноза погоды с заблаговременностью до 10 суток. Модель ПЛАВ также является компонентом системы вероятностного долгосрочного прогноза в Гидрометцентре России, а ее новая версия с разрешением около 20 км над территорией России рекомендована к оперативному внедрению.

Оригинальными особенностями блока решения уравнений динамики атмосферы модели ПЛАВ являются использование вертикальной компоненты абсолютной завихренности и дивергенции в качестве прогностических переменных, а также применение конечных разностей четвертого порядка на несмещенной сетке для аппроксимации неадвективных слагаемых уравнений. Существенным элементом для модели атмосферы, основанной на переменных «вертикальный компонент абсолютной завихренности – горизонтальная дивергенция», является быстрый и точный алгоритм восстановления компонент горизонтальной скорости ветра, описанный в [8]. Численные методы, применяемые в модели ПЛАВ, на тестовых задачах не уступают в точности спектральному методу решения уравнений динамики атмосферы, что было показано в [8].

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 [9, 10]. Блок расчета радиации использует свободнораспространяемые пакеты CLIRAD-SW [11] и RRTMG-LW [12] для коротко- и длинноволновой радиации, соответственно. Модель реализована на параллельных вычислительных системах с использованием сочетания технологий MPI и OpenMP.

Программный комплекс полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ [4,13] состоит из блока решения уравнений динамики атмосферы и набора параметризаций процессов подсеточного масштаба. Уравнения динамики атмосферы представляют собой осредненные уравнения

Навье-Стокса (уравнения Рейнольдса) на вращающейся сфере, записанные в приближениях Буссинеска и гидростатики. Для их решения используется широко используемый в моделях прогноза погоды полулагранжев подход к представлению адвекции (переноса) [14] и полуявный метод интегрирования по времени. Сущность этого метода состоит в линеаризации уравнений относительно некоторого стационарного состояния и последующей записи нелинейных слагаемых уравнений динамики в виде суммы линейной части и нелинейного остатка. Линейная часть затем интегрируется по времени с помощью неявной схемы Кранк-Николсон; остаток интегрируется по явной схеме.

В блоке параметризаций рассчитываются правые части уравнений, описывающие источники и стоки подсеточного масштаба для импульса, тепла и влаги, например, вследствие процесса глубокой конвекции.

Описание программной реализации модели на основе сочетания технологий MPI и OpenMP (гибридной технологии) описывается в [13]. Одномерная декомпозиция по широте здесь дополнена параллельной реализацией наиболее трудоемких вычислительных блоков на основе OpenMP вдоль долготы [15]. Код модели также адаптирован к применению на сопроцессорах Intel Xeon Phi в режимах native и offload. Работу с файловой системой в модели ПЛАВ обеспечивает система параллельного ввода-вывода [15], которая позволяет задействовать как вычислительные, так и внешние (дополнительные) ядра для выполнения операций чтения и записи.

### 3. Модель Мирового океана

Численная модель Мирового океана ИВМИО (Институт вычислительной математики и Институт океанологии) [5] разработана для исследования изменчивости термогидродинамического состояния морских вод в широком диапазоне пространственных и временных масштабов – от синоптических до климатических. Модель относится к классу 3DPEM: полная система уравнений трёхмерной динамики океана в приближениях Буссинеска и гидростатики аппроксимирована в ней методом конечных объёмов на сетке типа B в вертикальных z-координатах. Поверхность раздела воздух-вода свободная, описывается нелинейным кинематическим условием с учетом потоков массы воды, при этом воспроизводятся пространственная изменчивость топографии поверхности океана и изменчивость его среднего уровня. Изменчивость морского льда описываются с помощью термодинамической модели [16].

Для аппроксимации производных по горизонтали в модели ИВМИО используются явные алгоритмы, а вертикальный оператор диффузии аппроксимируется на основе неявного подхода по схеме Кранка-Николсон. Применение явного по времени метода аппроксимации для уравнений переноса импульса и уравнения свободной поверхности приводит к необходимости разделения решения системы на сравнительно медленные бароклинные и быстрые баротропные движения. Бароклинные движения интегрируются на основе трехмерных уравнений. Баротропная компонента интегрируется на основе двумерных уравнений мелкой воды, для решения которых используется оригинальный алгоритм [17] с аппроксимацией по времени на основе [18]. Для дополнительного обеспечения численной устойчивости в уравнениях переноса импульса, температуры и солёности применяются бигармонические фильтры.

В модели океана ИВМИО используется трехполярная система координат [19], в которой полюса сетки располагаются на суше. В программном комплексе применяется двумерная декомпозиция в горизонтальной плоскости. Тестовые расчёты показали почти линейную масштабируемость работы модели вплоть до 32400 процессорных ядер с пространственным разрешением  $0.1^\circ$ . Следует отметить, что ввод-вывод данных полностью распараллелен с помощью средств программного комплекса совместного моделирования CMF 2.0 [6, 7].

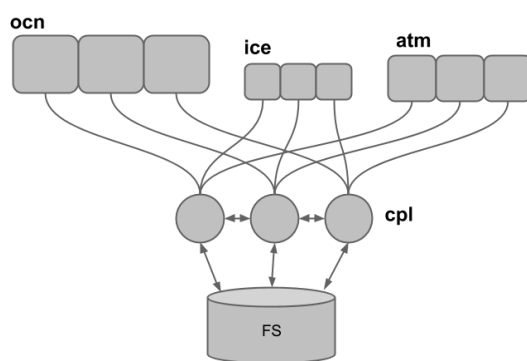
### 4. Особенности реализации совместной модели

Компактная вычислительная платформа для моделирования CMF 2.0 (Coupled Modelling Framework) - это программный комплекс для совместного моделирования Земной системы и ее компонентов высокого разрешения на параллельных вычислительных системах. CMF 2.0 является развитием идеи высокоуровневого драйвера: за счет использования абстрактных интер-

фейсов главная программа и каплер становятся полностью независимыми от количества подключаемых моделей — для работы в совместной системе пользователю достаточно создать производный класс своей компоненты [6].

На рисунке 1 [7] приводится блок-схема совместной модели с тремя моделями-компонентами (atm - модель атмосферы, ocn - модель океана и ice - модель морского льда) и каплером (cpl). Можно видеть, что каждое ядро каплера (всего их 3) взаимодействует с подмножеством ядер из физического компонента, что означает локальность данных и коммуникаций.

SMF 2.0 поддерживает полный цикл работы модели: подготовку начальных данных и предварительный расчет интерполяционных весов, организацию вычислений совместной модели (каплинг) и последующую визуализацию результатов с помощью Python-скриптов. Процедуры задания сетки каждого компонента и подготовки интерполяционных весов в SMF вынесены в отдельную программу, выполнение которой производится на довычислительном этапе один раз.



**Рис. 1.** Архитектура совместной модели в SMF 2.0. В данном примере представлено 3 компонента: океан (ocn), лед (ice) и атмосфера (atm). Они объединены 3-ядерным каплером (cpl), который обеспечивает взаимодействие компонентов и работает с файловой системой (FS).

С помощью системы SMF 2.0 модель атмосферы ПЛАВ и модель Мирового океана ИВМИО были объединены в единый программный комплекс. Наиболее трудоемкими оказались работы по адаптации программного кода модели ПЛАВ в целях использования в рамках SMF. Так, например, в модель ПЛАВ была добавлена возможность задания внешнего коммуникатора и явно выделены подпрограммы, ответственные за инициализацию модели, чтение начальных данных, подготовку к вычислениям и выполнения одного шага по времени. Адаптация кода модели ИВМИО не проводилась, поскольку SMF2.0 уже является неотъемлемой частью модели Мирового океана: с ее помощью реализована работа с файловой системой и параллельные обмены.

Наиболее важным этапом создания единого программного комплекса под управлением SMF является программирование производного типа, отвечающего конкретному компоненту (подробности приведены в [6]). Программирование производного типа компонента предполагает реализацию 6 методов, большая часть которых является естественными элементами современной программы для научных расчетов. Эти методы включают инициализацию основных параметров компонента, регистрацию компонента в системе SMF (передача размерности компонента, структуры сетки, шага по времени и пр.), регистрацию передаваемых и получаемых компонентом массивов данных с указанием целевого компонента и периода времени между обменами, процедуру выделения памяти под динамические массивы каждого компонента, инициализацию компонента, чтение начальных данных и подготовка к расчетам, а также выполнение одного шага по времени компонентом. Поэтому SMF имеет сравнительно небольшую документацию, а подключение к ней заключается в программировании дополнительного для компонента файла без существенной переработки кода самой модели.

Единый исполняемый файл создается специальной программой, входными аргументами которой являются условные идентификаторы каждого компонента, предварительно скомпилированного в виде отдельной библиотеки.

## 5. Предварительные результаты совместного моделирования

С помощью системы SMF2.0 модель атмосферы ПЛАВ с горизонтальным разрешением  $0.9^\circ$  по долготе,  $0.72^\circ$  по широте (размерность сетки  $400 \times 251$ ), 28 уровнями по вертикали и модель Мирового океана с разрешением  $0.5^\circ$  (соответствует сетке с числом узлов по долготе 720, по широте 360) и 49 вертикальными уровнями были объединены в единый программный комплекс. Шаг по времени модели атмосферы в численных экспериментах составлял 1200 с, а модели Мирового океана - 600 с. Блок расчета радиационных притоков тепла в модели ПЛАВ выполнялся каждый модельный час. Изменение индекса покрытия поверхности океана морским льдом во времени считалось предписанным.

Модель атмосферы каждый час передавала 9 двумерных полей в модель океана: потоки коротко- и длинноволновой радиации, потоки скрытого и явного тепла, количество накопленных за период между обменов выпавших осадков, масса испарившейся воды, температура воздуха на высоте 2 метра и 2 компонента вектора напряжения трения ветра. В свою очередь модель океана каждые 2 часа передавала в модель атмосферы 3 поля: температуру поверхности океана, сплоченность и температуру льда.

На рисунке 2 иллюстрируется масштабируемость совместной модели и моделей атмосферы и океана в отдельности. Замеры производились на вычислительной системе «РСК Торнадо», установленной в ГВЦ Росгидромета. Можно видеть, что совместная модель масштабируется несколько хуже модели атмосферы, чье ускорение, в свою очередь, растет с увеличением числа ядер не так быстро, как у модели океана. Такая зависимость объясняется невозможностью выбора оптимального соотношения числа ядер для каждого компонента, поскольку программная реализация SMF содержит условие сбалансированной нагрузки каждого ядра каплера в процедурах, ответственных за выполнение операций переинтерполяции данных. Поскольку время выполнения указанных операций существенно меньше по сравнению со временем расчета каждого компонента между обменов, в новой версии SMF от подобного ограничения предполагается отказаться.

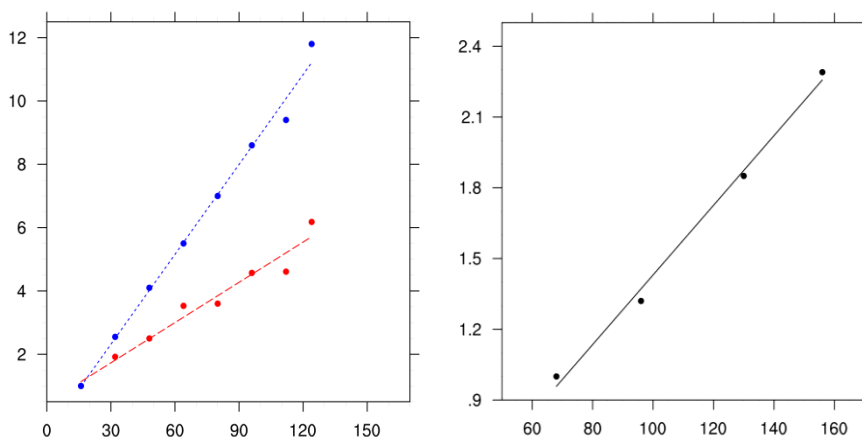


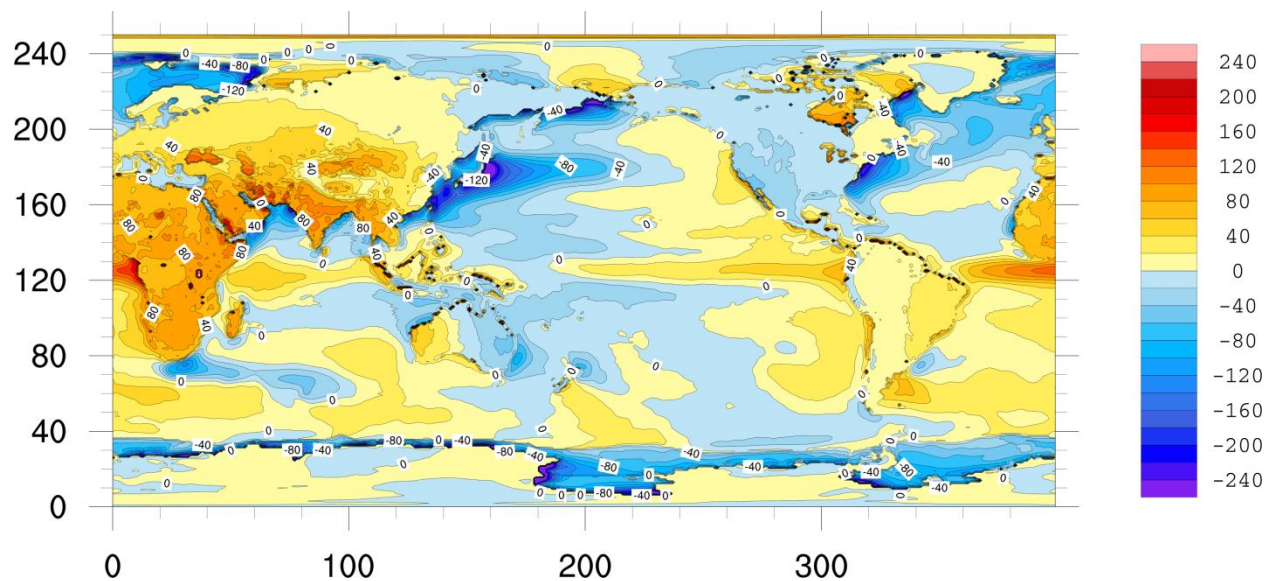
Рис. 2. Слева - параллельное ускорение модели океана (точечная синяя линия) и модели атмосферы (пунктирная красная линия) по отношению ко времени счета на 16 процессорных ядрах как функция количества процессорных ядер. Справа – параллельное ускорение совместной модели в зависимости от числа используемых ядер по отношению ко времени счета на 64 ядрах.

Размер коммуникатора компонентов в эксперименте следующий: 68 ядер соответствуют конфигурации, при которой 30 ядер отводится модели океана, а 36 ядер - модели атмосферы. 96 ядер - это 52 ядра для модели океана, 42 ядра для модели атмосферы и 2 ядра для каплера. Вариант с 130 ядрами соответствует версии совместной модели с 64 ядрами для каждого физического компонента и двумя ядрами для каплера, а вариант со 160 ядрами использует 63 ядра для атмосферы, 90 ядер для океана и 3 ядра для каплера. Дополнительные эксперименты показали,

что от числа ядер каплера общее время счета практически не зависит. Также следует отметить, что конфигурация с 96 ядрами позволяет выполнять расчеты со скоростью 2 модельных года в сутки.

На рисунке 3 приводится осредненный за год суммарный поток тепла на поверхности на 420 модельный день. Можно видеть неплохое качественное и количественное согласие с данными реанализа [20]. Хорошо воспроизводится амплитуда потока в районе течений Гольфстрима и Куроисио, где происходит интенсивный обмен теплом между атмосферой и океаном. Совместная модель правильно воспроизводит временную динамику снега (выпадение и стаивание в Евразии и северной Америке). На суше, покрытой снегом в течение всего года (Антарктида, Гренландия) суммарный среднегодовой поток близок к нулю, как и в наблюдениях. Ложный поток из атмосферы в почву в Азии и Африке является следствием относительно простой модели двуслойной почвы, в которой значение и годовой ход температуры глубинного слоя почвы релаксируют к предписанным средним многолетним значениям. В настоящее время большинство моделей Земной системы перешли на модели многослойной почвы, где температура глубинного слоя почвы задается только в начальных данных. Ведутся работы по внедрению в модель ПЛАВ модели многослойной почвы, разработанной в ИВМ РАН [21].

Совместная модель атмосфера-океан в экспериментах запускалась на срок до трех модельных лет и показала стабильную работу каждого компонента и системы в целом. После доработок совместную модель предполагается опробовать на серии сезонных прогнозов, а затем выполнить эксперименты по воспроизведению современного климата согласно протоколу международного эксперимента CMIP.



**Рис. 3.** Усредненный за год суммарный поток тепла на поверхности ( $Вт/м^2$ ) на 420 модельный день в эксперименте с совместной моделью атмосфера-океан. Отрицательные значения соответствуют потоку в атмосферу.

## Литература

1. Hoskins B. The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: a stimulus for our science // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 2013. V. 139. P. 573-384.
2. Pellerin P., Ritchie H., Saucier F.J., Roy F., Desjardins S., Valin M. and Lee V. Impact of a two-way coupling between an atmospheric and an ocean-ice model over the Gulf of St. Lawrence // Mon. Weather Rev. V. 132, P.1379-1398.
3. MacLachlan C., Arribas A., Peterson K. A., Maidens A., Fereday D., Scaife A. A., Gordon M., Vellinga M., Williams A., Comer R. E., Camp J., Xavier P., Madec G. Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): a high-resolution seasonal forecast system // Q.J.Roy.Meteorol.Soc. 2015. V. 141. P. 1072 – 1084.

4. 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.
5. Ибраев Р.А., Хабеев Р.Н., Ушаков К.В. Вихреразрешающая  $1/10^\circ$  модель Мирового океана // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2012. 48(1), С. 45–55.
6. Калмыков В.В., Ибраев Р.А. Программный комплекс совместного моделирования системы океан–лед–атмосфера–почва на массивно-параллельных компьютерах // Вычислительные методы и программирование, 2013. 14. С. 88–95.
7. Калмыков В.В., Ибраев Р.А. CMF - фреймворк для модели Земной системы высокого разрешения. Сборник трудов международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России, Москва, 28-29 сентября 2015 г.». М., 2015, изд. дом МГУ. С. 34-40.
8. Tolstykh M.A., Shashkin V.V. Vorticity–divergence mass-conserving semi-Lagrangian shallow-water model using the reduced grid on the sphere // J. Comput. Phys. 2012. V. 231. P. 4205-4233.
9. 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 // Parameterization of subgrid-scale physical processes, ECMWF Seminar proceedings. - Reading, UK: 1994. P. 385-402.
10. De Troch R., Hamdi R., van de Vyver H., Geleyn J.-F., Termonia P. Multiscale Performance of the ALARO-0 Model for Simulating Extreme Summer Precipitation Climatology in Belgium // J. Climate. 2013. V. 26 P. 8895-8915.
11. Tarasova T., 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. V. 24, № 6. P. 1157–1162.
12. Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J. and Clough S.A.: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave radiation// J. Geophys. Res. 1997. V. 102, N 16, 663-16, 682.
13. Толстых М.А., Мизяк В.Г. Параллельная версия полулагранжевой модели ПЛАВ с горизонтальным разрешением порядка 20 км. // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2011, вып. 346. С. 181-190.
14. Staniforth A., Côté J. Semi-Lagrangian integration schemes for atmospheric models. A re-view // Mon. Weather Rev. 1991. V. 119. P. 2206–2223.
15. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Мизяк В.Г. Шашкин В.В. Параллельный программный комплекс модели атмосферы для прогноза погоды и моделирования климата. Сборник трудов международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России, Москва, 28-29 сентября 2015 г.» 2015, изд. дом МГУ, с 356-367.
16. Schrum C., Backhaus J. Sensitivity of atmosphere-ocean heat exchange and heat content in North Sea and Baltic Sea. A comparative Assessment, Tellus, 51A, 1999. P. 526-549.
17. Калмыков В.В., Ибраев Р.А. Алгоритм с перекрытиями для решения системы уравнений мелкой воды на параллельных компьютерах с распределенной памятью. Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17. №5(58). С. 252-259.
18. Killworth P.D., Stainforth D., Webb D.J., Paterson S. The development of a free surface Bryan-Cox-Semtner model. J. Phys. Oceanogr. 1991. V. 21. P. 1333-1348.
19. Murray R.J. Explicit Generation of Orthogonal Grids for Ocean Models. J. Comp. Phys. 1996. V. 126. N 2. P. 251-273.14.
20. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U, Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Hólm E. V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q.J.Roy.Meteorol.Soc. 2011. V.137. P. 553-597.
21. 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.



## Parallel implementation of the coupled atmosphere-ocean model for seamless weather prediction and climate change modelling

R.Yu. Fadeev<sup>1</sup>, K.V. Ushakov<sup>2,1</sup>, M.A. Tolstykh<sup>1,3</sup>, R.A. Ibrayev<sup>1,2,3</sup>, V.V. Kalmykov<sup>2</sup>

Institute of Numerical Mathematics RAS<sup>1</sup>, Institute of Oceanology RAS<sup>2</sup>, Hydrometcentre of Russia<sup>3</sup>

Coupled atmosphere-ocean-sea ice models are widely used for climate change modelling. However, there is now more and more evidence on necessity to use such models in numerical weather prediction at different time scales. An advanced coupled model is developed at the Institute of Numerical Mathematics, Shirshov Institute of Oceanology (Russian Academy of Sciences), and Hydrometcentre of Russia. Particularities of program implementation for this model are discussed. The atmosphere model SLAV, the World Ocean model INM-IO and the sea-ice model CICE are coupled using the original program complex for coupled modelling CMF. The distinct feature of CMF is the use of abstract interfaces. That is why the main program and the coupler do not depend on the amount of models to be coupled. To organize the interaction between model components, it is sufficient just to code an additional derived type without significant changes in the source codes of the models themselves. The results of numerical experiments with the coupled model demonstrate an agreement with observation data and show a possibility to use this model for probabilistic weather forecasts at time scales from weeks to year.

**Keywords:** coupled atmosphere-ocean-sea ice models, numerical weather prediction, climate change modelling

### References

1. Hoskins B. The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: a stimulus for our science // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 2013. V. 139. P. 573-384.
2. Pellerin P., Ritchie H., Saucier F.J., Roy F., Desjardins S., Valin M. and Lee V. Impact of a two-way coupling between an atmospheric and an ocean-ice model over the Gulf of St. Lawrence // *Mon. Weather Rev.* V. 132, P.1379-1398.
3. MacLachlan C., Arribas A., Peterson K. A., Maidens A., Fereday D., Scaife A. A., Gordon M., Vellinga M., Williams A., Comer R. E., Camp J., Xavier P., Madec G. Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): a high-resolution seasonal forecast system // *Q.J.Roy.Meteorol.Soc.* 2015. V. 141. P. 1072 – 1084.
4. Tolstykh M. A., Geleyn J.-F., Volodin E. M., Bogoslovskii N. N., Vilfand R. M., Kiktev D. B., Krasjuk T. V., Kostykin S. V., Mizyak V. G., Fadeev R. Yu., Shashkin V. V., Shlyaeva A. V., Ezau I. N., Yurova A. Yu. Development of the Multiscale Version of the SL-AV Global Atmosphere Model. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, Vol. 40, No. 6, pp. 374–382.
5. Ibrayev R.A., Khabeev R.N., Ushakov K.V. Eddy-resolving 1/10° model of the World Ocean. // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012. V. 48. N 1. P. 37-46.
6. Kalmykov V.V., Ibrayev R.A. Programmnyi kompleks sovместnogo modelirovaniya sistemi ocean—led-atmosfera-pochva na massivno-parallelnih komp'uterah [A framework for the ocean-ice-atmosphere-land coupled modeling on massively-parallel architectures] // *Vichislitelnie metodi i programmirovaniye* [Numerical Methods and Programming]. 2013. V. 14. P. 88–95.
7. Kalmykov V.V., Ibrayev R.A. CMF – freimwork dlia modeli Zemnoi sistemi visokogo razresheniya [CMF – framework for high-resolution Earth system model] // *Sbornik trudov mezhdunarodnoi konferencii `Superkomputernie dni Rossii, Moskva 28-29 sentiabrya 2015 g.`* [Procs. Int. Conf. 'Russian Supercomputing days'15]. 28-29.09.2015. Moscow, MSU publishers, 2015. P. 34-40.
8. Tolstykh M.A., Shashkin V.V. Vorticity–divergence mass-conserving semi-Lagrangian shallow-water model using the reduced grid on the sphere // *J. Comput. Phys.* 2012. V. 231. P. 4205-4233.



9. 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 // Parameterization of subgrid-scale physical processes, ECMWF Seminar proceedings. - Reading, UK: 1994. P. 385-402.
10. De Troch R., Hamdi R., van de Vyver H., Geleyn J.-F., Termonia P. Multiscale Performance of the ALARO-0 Model for Simulating Extreme Summer Precipitation Climatology in Belgium // J. Climate. 2013. V. 26 P. 8895-8915.
11. Tarasova T., 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. V. 24, № 6. P. 1157–1162.
12. Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J. and Clough S.A.: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave radiation// J. Geophys. Res. 1997. V. 102, N 16, 663-16, 682.
13. Tolstykh M.A., Mizyak V.G. Parallel'naya versiya polulagranzhevoy modeli PLAV s gorizontal'nym razresheniem poryadka 20 km. [Parallel version of the semi-lagrangian model SLAV with the horizontal resolution of about 20 km] // Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiiskoi Federacii. [Proceedings of Hydrometcentre of Russia] 2011, N 346. P. 181-190.
14. Staniforth A., Côté J. Semi-Lagrangian integration schemes for atmospheric models. A review // Mon. Weather Rev. 1991. V. 119. P. 2206–2223.
15. Tolstykh M.A., Fadeev R.Yu., Mizyak V.G. , Shashkin V.V. Parallel'nyy programmnyy kompleks modeli atmosfery dlya prognoza pogody i modelirovaniya klimata. [Parallel program complex of the atmosphere model for weather prediction and climate modeling.] Sbornik trudov mezhdunarodnoi konferencii `Superkomputernie dni Rossii, Moskva 28-29 sentiabrya 2015 g.» [Procs. Int. Conf. 'Russian Supercomputing days'15]. 28-29.09.2015. Moscow, MSU publishers, 2015. P. 356-367.
16. Schrum C., Backhaus J. Sensitivity of atmosphere-ocean heat exchange and heat content in North Sea and Baltic Sea. A comparative Assessment, Tellus, 51A, 1999. P. 526-549.
17. Kalmykov V.V., Ibrayev R.A. Algoritm s perekritiami dlia reshenia sistemi uravnenii melkoi void na massivno-parallelnih komp'uterah s raspredelennoi pamiatiu [The overlapping algorithm for solving shallow water equations on massively-parallel architectures with distributed memory] //Vestnik UGATU. 2013. V. 17. №5(58). P. 252-259.
18. Killworth P.D., Stainforth D., Webb D.J., Paterson S. The development of a free surface Bryan-Cox-Semtner model. J. Phys. Oceanogr. 1991. V. 21. P. 1333-1348.
19. Murray R.J. Explicit Generation of Orthogonal Grids for Ocean Models. J. Comp. Phys. 1996. V. 126. N 2. P. 251-273.14. модель льда
20. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U, Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Hólm E. V., Isaksen L., Kállberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q.J.Roy.Meteorol.Soc. 2011. V.137. P. 553-597.
21. Volodin E.M., Lykossov V.N. Parametrization of Heat and Moisture Transfer in the Soil–Vegetation System for Use in Atmospheric General Circulation Models: 1. Formulation and Simulations Based on Local Observational Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 1998. V. 34, № 4. P. 402-416.