

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
КАУРКИНА Максима Николаевича «Параллельный алгоритм ансамблевой  
оптимальной интерполяции усвоения данных наблюдений в модели динамики  
океана высокого пространственного разрешения»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 05.13.18 – «Математические  
моделирование, численные методы и комплексы программ»

**Актуальность.** Актуальность работы сомнений не вызывает. Системы усвоения данных в настоящее время являются необходимым дополнением к гидродинамическим моделям атмосферы и океана, ориентированным на решение задач кратко-, средне- и долгосрочного прогноза состояния этих сред. При этом, необходимость реализации системы усвоения на многоядерных компьютерах является важным обстоятельством при выборе математической формулировки метода усвоения, методов решения возникающих систем линейных уравнений, а также при программной реализации алгоритмов. В России эта область науки и технологии отстает от уровня действующих оперативных систем усвоения в ведущих странах, что повышает востребованность усилий разработок в этом направлении.

**Обоснованность и достоверность.** Выбор метода усвоения для модели океана – ансамблевой оптимальной интерполяции – выполнен в настоящей работе с учётом обширного мирового опыта использования различных подходов, включающих также оптимальную интерполяцию, 3-х- и 4-хмерное усвоение, варианты фильтра Калмана. Показано, что ансамблевую оптимальную интерполяцию можно считать компромиссом между достигаемой с помощью усвоения точностью модели океана и вычислительной сложностью усвоения. Алгоритм усвоения получен в ходе математических выкладок из исходных уравнений оптимальной интерполяции с минимальными приближениями, которые всегда обоснованны (например, некоррелированность



ошибок модели с ошибками наблюдений). Эффективность метода усвоения показана как в идеализированном эксперименте, так и в расчётах океанической циркуляции в Северной Атлантике, причём точность модели повышается не только по отношению к ассимилированным данным, но и по отношению к независимым наблюдениям. Показана почти идеальная (эффективность ~100%) масштабируемость алгоритма усвоения на суперкомпьютере «Ломоносов». Результаты работы представлены в рецензируемых изданиях в необходимом и достаточном для кандидатских диссертаций объёме.

**Научная и практическая значимость.** Настоящая работа – необходимый и важный шаг в направлении создания российской оперативной системы моделирования Мирового океана высокого и сверхвысокого разрешения, разрабатываемой ведущим в данной области коллективом России.

**Другие достоинства работы.** Работу отмечает обширный обзор литературы, в котором подробно рассматриваются различные подходы к усвоению данных в моделях океана и опыт их применения в ведущих прогностических центрах; много внимания также уделено имеющимся средствам наблюдений, их особенностям с точки зрения ассимиляции. Отрадно также отметить, что соискатель диссертации в ряде случаев приводит физические интерпретации получаемым модельным результатами, что в целом нехарактерно для работ по специальности 05.13.18. Математическая постановка задачи и алгоритмы изложены достаточно полно и не допускают неоднозначной трактовки. Ценным результатом работы представляется, в частности, то, что при усвоении данных только по уровню поверхности океана заметно улучшается также воспроизведение полей температуры и солёности. При реализации алгоритмов используется объектно-ориентированное программирование. Работа отличается хорошим русским языком.

**Содержание работы.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и изложена на 126 страницах. Список литературы включает 135 наименований.



В *первой главе* диссертации приводится описание используемой математической модели динамики океана ИВМИО, модели термодинамики льда CICE и вычислительной платформы CMF 3.0, в рамках которой реализован параллельный алгоритм усвоения данных.

Во *второй главе* проводится обзор существующих методов и систем усвоения данных для моделей динамики океана, а также обзор источников данных наблюдений и их характеристик; формулируются физические требования к методу усвоения.

В *третьей главе* приводится описание разработанных вычислительных параллельных алгоритмов усвоения данных на основе многомерной оптимальной интерполяции (MVOI) и ансамблевой оптимальной интерполяции (EnOI), и представлены особенности их программной реализации для массивно-параллельных компьютеров с распределенной памятью.

В *четвертой главе* обсуждаются результаты работы разработанного параллельного алгоритма усвоения данных спутниковой альтиметрии и данных о температуре и солености с дрейфтеров ARGO в модели динамики океана ИВМИО для Северной Атлантики. Приводится оценка эффективности работы системы усвоения, выполняется сравнение с независимыми данными наблюдений и результатами других научных коллективов. Оценивается масштабируемость разработанного метода.

В *заключении* формулируются основные результаты диссертационной работы.

В *приложении* приводится краткое описание разработанных программ.

**Соответствие содержания диссертации специальности.** Содержание и результаты работы полностью соответствуют паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, поскольку основными результатами работы получены для математической модели динамики океана высокого пространственного разрешения. В частности для модели разработаны новые параллельные вычислительные алгоритмы



усвоения данных наблюдений, а также написана их программная реализация в виде программного сервиса вычислительной платформы совместного моделирования CMF 3.0.

**Недостатки работы.** Существенных замечаний, которые бы портили впечатление от работы, нет. Можно, однако, отметить следующие.

*Замечания по существу:*

- в названии работы слово «усвоения» представляется лишним;
- в работе неоднократно (например, на стр. 11) упоминаются величины, входящие в вектор состояния модели, и среди них нет вертикальной скорости, хотя в гидростатической модели она рассчитывается из уравнения неразрывности;

- при описании баротропной динамики модели океана используется явная схема (стр. 25, 32); однако баротропные гравитационные волны являются наиболее быстрыми, что должно приводить к необходимости очень малых шагов по времени; какие характерные шаги по времени в модели ИВМИО? – в работе не приводится;

- на стр. 26 система уравнений модели океана названа «полной», хотя она гидростатическая;

- на стр. 58 и далее матрица  $B$  определяется как матрица ковариации *решения* модели. Однако в исходных формулировках методов усвоения элементами этой матрицы являются ковариации *ошибок* модели. При каких предположениях происходит переход от матрицы ковариации ошибок к матрице ковариации решения и насколько они справедливы для океана?

- при описании метода оптимальной интерполяции (стр.59) приводятся элементы матрицы  $B$  (ур. 3.3), как функция расстояния между точками. Во-первых, поскольку максимальное значение элементов из этой формулы получается 1, то это, по-видимому, значения корреляции, а не ковариации. Во-вторых, эта формула не даёт ковариации различных величин, например, температуры и солёности. В-третьих, в ней используется расстояние в градусах, почему не обычное расстояние в метрах?



- на стр.60 при выборе радиуса корреляции используется скорость распространения возмущения в океане, принимаемая равной скорости течения, в то время как следует учитывать также скорость волн, особенно бароклинных;

- на стр. 64 вводится матрица  $E$ , ур. 3.11, однако не указано, каким методом она находится;

- в алгоритме ансамблевой оптимальной интерполяции используется сингулярное разложение (стр. 69), однако не упомянуто, каким методом оно вычисляется;

- параллельная реализация алгоритма усвоения расписана недостаточно детально: как параллельно реализованы операции матрично-векторного произведения, произведения матрицы на матрицу в формулах 3.32-3.35? Реализовано ли параллельно и если да, то как, нахождение матрицы  $E$ , сингулярное разложение?

- ввиду специальности по которой защищается диссертация, работу усилили бы оценки отношения количества арифметических операций к количеству операций MPI-обменов, аналитические оценки масштабируемости алгоритма усвоения;

- из описания построения ансамбля решений на стр.75-76 можно понять, что для каждого месяца можно было получить  $5 \text{ лет} * 3$  (3 контрольной точки на каждый месяц) = 15 членов ансамбля для каждого месяца, в то время как далее в тексте упоминается значительно большее число членов ансамбля;

- в экспериментах по усвоению непонятно: (i) почему не было проведено эксперимента, где усваивались бы и данные по температуре и солёности, и данные по уровню океана, какие существуют к этому препятствия, (ii) почему при усвоении только данных по температуре и солёности не проверялся эффект усвоения на ошибку уровня океана? (обратное – проверялось);

- в работе приводятся эксперименты на чувствительность результатов усвоения к заданию элементов матрицы ошибок наблюдений  $R_c$  (стр.96), находится оптимальное значение; однако этот параметр не может быть в чистом виде подгоночным, у приборов есть известная погрешность, ошибки

репрезентативности, однако это никак не обсуждается;

- в тексте не приводятся ссылок на публикации, посвящённые использованным суперкомпьютерным комплексам, в то время как эти ссылки обязательны по правилам использования этих суперкомпьютеров.

*Редакторские замечания:*

- вместо «Тасманское море» следует писать «Тасманово море»;

- автор часто использует слово «порядка» перед значением физической величины, когда по смыслу правильным является «приблизительно», «примерно», «около», и т.д.

**Заключение.** В работе решена актуальная и безусловно практически значимая задача. Уровень работы соответствует мировому. Приведённые в настоящем отзыве недостатки не сказываются на общем без сомнения положительном впечатлении от работы, она обнаруживает квалификационные качества соискателя, соответствующие искомой степени.

**Автореферат** диссертации адекватно отражает ее содержание.

Диссертационная работа М.Н. Кауркина является законченным научным исследованием и соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Кауркин Максим Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук (25.00.30 – «Метеорология, климатология, агрометеорология»), ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского вычислительного центра (НИВЦ МГУ) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени



М.В.Ломоносова».

Адрес: 119234, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 4, НИВЦ МГУ

Телефон: +7 495 939 23 53


E-mail: [stepanen@srcc.msu.ru](mailto:stepanen@srcc.msu.ru)

30 августа



Степаненко Виктор Михайлович

Директор НИВЦ МГУ,  
профессор  
Владимирович



Тихонравов

Александр

