

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Кныша Василия Васильевича

на диссертационную работу Кауркина Максима Николаевича

«Параллельный алгоритм ансамблевой оптимальной интерполяции

усвоения данных наблюдений в модели динамики океана высокого

пространственного разрешения»,

представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических

наук по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные

методы и комплексы программ»

Диссертационная работа М.Н. Кауркина «Параллельный алгоритм ансамблевой оптимальной интерполяции усвоения данных наблюдений в модели динамики океана высокого пространственного разрешения» посвящена разработке и реализации методов усвоения данных наблюдений на основе динамико-стохастического подхода для модели динамики океана высокого пространственного разрешения. В частности, в работе предложен новый параллельный метод ансамблевой оптимальной интерполяции усвоения спутниковых и дрейферных данных наблюдений за океаном, пристальное внимание уделено его практической реализации, проведено множество численных экспериментов для модели динамики океана ИВМИО, подтверждающих эффективность предложенного подхода.

*Актуальность работы.* Задача использования увеличивающихся объемов данных наблюдений в моделях для изучения океанических процессов является актуальной и востребованной. Особенно это важно для систем прогноза состояния океана, работающих в оперативном режиме. В этом случае критичным становится вопрос времени решения уравнений модели и выполнения алгоритмов усвоения данных наблюдений для построения среднесрочных и краткосрочных прогнозов. По данным последних работ пространственное разрешение моделей не должно быть больше  $0.1^{\circ}$ , что позволяет моделировать поведение вихревых структур. Ассимиляция спутниковых данных наблюдений предоставляет возможность своевременно обнаружить такие структуры и позволяет предсказывать такие природные явления, как штормы, интенсивные вихри и течения. Эффективное решение отмеченных задач настоятельно требует использования параллельных вычислений на компьютерах с распределенной памятью из-за огромного объема получаемой информации. Рассмотренные в диссертации задачи, как и тематика работы в целом, являются весьма актуальными.

Полученные автором результаты несомненно имеют существенную теоретическую и практическую значимость.



**Научная новизна.** Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми. Представленная в работе система усвоения дрейфтерных и спутниковых данных океанических наблюдений, которая состоит из математической модели динамики океана ИВМИО разрешения  $0.1^{\circ}$ , программного комплекса совместного моделирования CMF3.0 и работающего на его базе программного сервиса усвоения данных наблюдений методом ансамблевой оптимальной интерполяции с параллельной реализацией, является первой в России системой такого типа. Она способна работать на пространственных глобальных сетках с высоким разрешением.

**Практическая значимость.** Об эффективности программной реализации предложенного метода свидетельствуют результаты весьма тщательного проведения тестирования на современных суперкомпьютерах посредством проведения численных экспериментов (глава 4). Разработанная система усвоения данных позволяет усваивать различные данные спутниковых и дрейфтерных наблюдений и корректировать данные модельных расчетов, значительно повышая качество восстановления полей океана. С ее применением в модели Северной Атлантики ИВМИО с пространственным разрешением  $0.1^{\circ}$  были усвоены данные о температуре и солености с дрейфтеров ARGO и данные спутниковой альтиметрии AVISO. Показано, что ошибки прогноза после усвоения по сравнению с контрольным расчётом уменьшаются почти в два раза и в целом эффективность всей системы находится на мировом уровне в плане качества моделирования и параллельной масштабируемости. Предложенная система усвоения данных наблюдений на базе модели океана ИВМИО ориентирована на использование в среднесрочном и долгосрочном прогнозе состояния океана.

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

Во *введении* раскрывается актуальность научной темы, приводится обзор литературы по теме диссертации, формулируются цели и задачи работы, представлена научная новизна и практическое значение работы, сообщается о публикациях и докладах по теме диссертации.

В *первой главе* диссертации приводится описание используемой математической модели динамики океана ИВМИО (основные уравнения термогидродинамических процессов, краевые условия, сетки, алгоритм решения), модели термодинамики льда CICE и вычислительной платформы CMF 3.0, в рамках которой реализован параллельный алгоритм усвоения данных.

Во *второй главе* проводится анализ существующих методов и систем усвоения данных для моделей океана высокого разрешения, а также обзор источников данных



наблюдений и их характеристик по следующим параметрам: объем, регулярность, пространственное покрытие; 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 с разрешением  $0.1^\circ$ . Приводится качественная и количественная оценка эффективности работы системы усвоения. Оценивается параллельная масштабируемость разработанного метода.

Выполняется сравнение с независимыми данными наблюдений и результатами других научных коллективов. Проводятся численные эксперименты для проверки алгоритма на синтетических данных наблюдений и выбора оптимальных параметров метода EnOI. Анализируется, как усвоение аномалии уровня океана влияет на те параметры, которые не усваиваются непосредственно - температуру и соленость.

В *заключении* формулируются основные результаты диссертационной работы.

В *приложении* приводится краткое описание разработанных программных продуктов, на которые получены «Свидетельства о государственной регистрации».

***Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов*** диссертационной работы подтверждается использованием строгих математических выводов со ссылками на статьи других авторов, сопоставлением результатов прогноза состояния океана с данными наблюдений, численными экспериментами по масштабируемости разработанной программы и сравнением характеристик решения с результатами, полученными в других работах. Результаты исследования представлены в 6 работах, удовлетворяющих требованиям ВАК: 3 из них входят в перечень ВАК; 1 статья, опубликованная в зарубежном сборнике, выпуски которого индексируются в международной системе цитирования Web of Science; 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Результаты диссертационной работы докладывались на российских и международных научных конференциях.

***Новые научные результаты***, полученные автором, следующие. Для усвоения данных наблюдений буев ARGO в модели динамики океана ИВМИО с разрешением  $0.1^\circ$  разработан параллельный алгоритм многомерной оптимальной интерполяции MVOI (глава 3). В качестве наиболее подходящего метода для ассимиляции в модели спутниковой альтиметрии и данных о температуре и солености с ARGO автором выбран



метод ансамблевой оптимальной интерполяции EnOI с учетом его точности и возможности распараллеливания (главы 2, 3). Для него создана программная архитектура и разработан параллельный алгоритм, написана программная реализация алгоритма в виде программного сервиса вычислительной платформы совместного моделирования CMF 3.0. Вычислительная эффективность и параллельная масштабируемость системы подтверждена тестами. Качественные и количественные оценки точности восстановления полей океана получены на основе серии численных экспериментов по модели ИВМИО с разрешением  $0.1^\circ$  для акватории Северной Атлантики с усвоением данных спутниковой альтиметрии AVISO и данных о температуре и солёности с дрейфтеров ARGO посредством сопоставления с независимыми данными наблюдений. Полученные оценки соответствуют результатам ведущих научных коллективов (глава 4).

**Соответствие содержания диссертации специальности.** Содержание и результаты работы полностью соответствуют паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», поскольку основные результаты работы получены для математической модели динамики океана высокого пространственного разрешения. В частности, для модели разработан новый параллельный вычислительный алгоритм усвоения данных наблюдений на основе ансамблевой оптимальной интерполяции (EnOI), а так же написана программная реализация параллельного алгоритма усвоения данных EnOI в виде программного сервиса вычислительной платформы совместного моделирования CMF 3.0.

**Замечания по работе.** Представленная на отзыв работа не свободна от недостатков. В частности,

- 1) Представляется излишне подробным описание модели ИВМИО в подразделах 1.2.1, 1.2.2.
- 2) Не понятно, использовался ли радиус отсечения при использовании ансамблевой оптимальной интерполяции.
- 3) В диссертации не обсуждается вопрос о том, до каких глубин океана значимы кросс-корреляции между аномалией уровня океана и температурой, аномалией уровня и солёностью, оцененные по ансамблю состояний. От них зависит влияние данных спутниковых аномалий уровня AVISO на восстановление профилей температуры и солёности.
- 4) При использовании коррекции температуры и солёности данными аномалий уровня AVISO на горизонтах среднее модельных и спутниковых аномалий на конкретном горизонте может не равняться нулю из-за влияния рельефа дна.
- 5) В целом научное и литературное качество работы высокое. Имеются мелкие погрешности текста: (а) на стр. 76 утверждается, что «Во всех экспериментах модельное решение ежедневно сравнивается со спутниковыми данными альтиметрии AVISO...», а в

табл.4.1 отмечено, что сравнение с AVISO в экспериментах A02 и A03 отсутствует. Было бы полезно иметь информацию о результатах такого сопоставления в экспериментах A02 и A03; (б) в последнем абзаце раздела 4.5 диссертации допущена неточность в названиях экспериментов A02 (метод EnOI) и A03 (метод MVOI).

**Общая оценка работы.** Отмеченные недостатки носят частный характер и не снижают ценности работы и обоснованности выводов и защищаемых положений. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Соискатель продемонстрировал высокий уровень квалификации, глубокие знания предмета исследования и научной литературы.

Диссертационная работа М.Н. Кауркина является законченным научным исследованием и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям, выполненным по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук (25.00.28 – «Океанология»), профессор, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН» (ФГБУН МГИ РАН)

Адрес организации: 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

Телефон: +7 8692 54 52 41,

E-mail: [vaknysh@yandex.ru](mailto:vaknysh@yandex.ru)

1 сентября 2017 г.



Кныш Василий Васильевич

Личную подпись доктора физико-математических наук Кныша Василия Васильевича заверяю.

Ученый секретарь  
ФГБУН МГИ РАН,  
к.ф.-м.н.



Алексеев Дмитрий Владимирович