УТВЕРЖДАЮ:
Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН»,
член-корреспондент РАН
_____ Коновалов С.К.

«28» сентября 2018 г.

ОТЗЫВ
ведущей организации
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Морской гидрофизический институт РАН»
на диссертационную работу
Зеленько Александра Андреевича
«Оперативная океанология: моделирование, мониторинг
и прогнозирование гидрофизических полей Мирового океана»,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России»).

Актуальность темы работы. Диссертационная работа посвящена проблеме исследования изменчивости океанических полей и развитию систем получения диагностических и прогностических оценок состояния океана в режиме, близком к реальному времени. Актуальность данной работы обусловлена, с одной стороны, необходимостью обеспечения возрастающих практических запросов от разных отраслей экономики, связанных с морской деятельностью, таких как навигация, рыболовство и марикультура, строительство и эксплуатация морских сооружений, добыча и транспортировка минеральных ресурсов, рекреация и т.д. С другой стороны, за последние годы произошло резкое развитие наземных и космических наблюдательных систем для океана, а также гидродинамических моделей, описывающих эволюцию

основных океанических характеристик. Это открывает новые возможности и обусловливает необходимость разработки соответствующих современных методов и систем мониторинга текущего состояния океана и прогнозирования его эволюции. Именно эти актуальные задачи рассматриваются в представленной диссертационной работе.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 326 наименований. Объем диссертации составляет 251 страницу текста, включая 16 таблиц и 77 рисунков.

В первой главе выполнен анализ главных составляющих действующей наблюдательной системы в океанах и морях как информационной базы для оперативного мониторинга изменчивости основных гидрофизических полей. Положительная особенность этой части работы – это комплексный обзор разнотипных наблюдательных подсистем контактных и дистанционных (спутниковых) измерений морских характеристик с точки зрения применимости этих подсистем для решения задач оперативной океанологии.

Во второй главе представлена модель общей циркуляции океана, разработанная при непосредственном участии автора диссертации, что отражено в публикациях, цитируемых в работе. Эта модель, основанная на системе полных уравнений геофизической гидродинамики, применяется далее для проведения исследований процессов крупномасштабной изменчивости гидрофизических полей и использования в качестве составной части системы усвоения океанографических данных. Модель прошла проверку в численных экспериментах по воспроизведению ситуаций с известными аналитическими решениями и апробирована в цикле опубликованных работ по воспроизведению общей циркуляции океана на сезонном и межгодовом масштабах.

В работе отмечается, что модель реализована с грубым пространственным разрешением и не разрешает синоптические процессы. Однако, следует иметь в виду, что развитие известной системы Copernicus в программе Mersea и MyOcean начиналось с использования моделей с разрешением ~1°. Аналогичная ситуация имеет место и с развитием моделей для Черного моря, когда первые работы в

Морском гидрофизическом институте по воспроизведению реального состояния моря выполнялись с разрешением около 15 км (при радиусе Россби ~25 км). Такой подход является логичным: прежде чем переходить к вихреразрешающим моделям, которые дают возможность освещать текущее состояние океана с достаточно подробно, учитывая синоптические масштабы, необходимо пройти этап использования модели относительно грубого разрешения. Поэтому представленная работа, с некоторым временным лагом, выполнена в русле основных тенденций развития системы оперативных прогнозов.

В третьей главе представлены новые результаты исследований крупномасштабной изменчивости основных гидрофизических полей, полученные с использованием разработанной модели общей циркуляции океана. Выполнен анализ механизмов развития конвективного перемешивания в открытом океане, проникающего до больших глубин (глубокая конвекция), на разных временных масштабах. К важным результатам здесь относится объяснение локализации главных районов глубокой конвекции в Северной Атлантике и выявление особенностей изменчивости характеристик глубокой конвекции на суточном и сезонном масштабах времени. Следует также признать полезным представленное исследование процессов адвекции и переноса водных масс путем анализа траекторий жидких частиц, то есть лагранжевых характеристик движения. Введение в рассмотрение ансамблевых траекторий указывает на хаотизацию переноса, возникающую в поле нестационарных крупномасштабных течений в Южном океане. При этом получены указания на вертикальное перераспределение массы – результирующее погружение вод из поверхностных слоев и их подъем из глубинных слоев.

В четвертой главе рассматривается система усвоения океанографических данных, разработанная при непосредственном участии диссертанта. Здесь также представлены результаты ретроспективного расчета (реанализа) основных гидрофизических полей Мирового океана. Такие системы являются одним из основных компонентов морских прогностических комплексов, обеспечивающих решение задач оперативной океанологии. Усвоение данных контактных и

спутниковых наблюдений производится по циклической схеме «анализ – прогноз – анализ» с применением трехмерного вариационного метода вычисления инкрементов анализа. Для получения первого приближения полей температуры и солености морской воды используются как рассмотренная ранее авторская модель общей циркуляции океана, так и известный модельный комплекс NEMO. Возможности разработанной системы усвоения данных продемонстрированы на материалах проведенного многолетнего ретроспективного анализа данных. Полученные показатели качества восстановленных полей температуры и солености воды свидетельствуют о том, что система усвоения данных дает оценки полей, превосходящие по точности как чисто модельный расчет (без учета наблюдений), так и климатические обобщения. Полученные характеристики точности согласуются с результатами подобных зарубежных систем с соответствующим пространственным разрешением используемых циркуляционных моделей, определяемым, в первую очередь, доступными вычислительными ресурсами.

В пятой главе представлена разработка комплексной системы прогнозирования параметров ветрового волнения в Мировом океане и морях европейской территории России. Полученные характеристики точности прогнозов ветрового волнения по акватории Мирового океана превосходят показатели других национальных прогностических систем и, в целом, не уступают показателям зарубежных систем. Реализацию представленной в диссертации прогностической системы можно рассматривать как решение важной хозяйственной задачи по обеспечению соответствующей оперативной информацией широкого круга пользователей, связанных с морской деятельностью.

Связанная с прогнозом волнения часть работы, хотя и несколько отстоит от содержания других глав, не является инородной. Так, известная прогностическая система Европейского союза «MyOcean» содержит в качестве основных составляющих модель циркуляции, модель волнения и модель экосистемы. Известно, что в районах интенсивных течений их влияние на обрушение волн и

другие параметры довольно значительно, и поэтому имеет смысл объединение моделей циркуляции и волнения в одну систему.

Обоснованность и достоверность результатов. Обоснованность полученных в работе результатов вытекает из корректного использования современного математического аппарата вычислительной гидродинамики, сопоставления полученных результатов численного моделирования с данными натурных наблюдений, а также сравнениями с результатами других авторов.

Практическая значимость полученных результатов. Разработанная система усвоения океанографических данных образует методическую основу для мониторинга текущего состояния океана. Такой мониторинг сопряжен с решением важных хозяйственных задач, связанных с исследованиями климата и развитием систем прогнозирования основных гидрофизических полей Мирового океана.

Относительно части работы, связанной с прогнозами ветрового волнения, следует отметить, что приложения прогностической системы для океана и ряда российских морей прошли ведомственную сертификацию Росгидромета и получили статус основных прогностических методов на национальном уровне. Оперативная информационная продукция распространяется через Интернет и через систему распределенных баз данных Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО).

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Полученный опыт при создании системы усвоения океанографических данных необходимо использовать в новых версиях прогностического комплекса с повышенным пространственным разрешением моделей, в связи с отмеченной в диссертации возможностью доступа к новым вычислительным ресурсам с производительностью около 1,2 Пфлопс. Учитывая успешность прогностической системы параметров ветрового волнения, реализованной для океана и некоторых морей, следует рекомендовать развитие системы для выполнения прогнозов и по остальным морям России. При этом целесообразно сопряжение волновой модели и модели циркуляции моря.

Замечания по диссертации:

1. В диссертации недостаточно подробно освещены другие работы по оперативной океанологии, в частности, исследования, проводимые в Морском гидрофизическом институте РАН применительно к Черному морю. Также скудно представлены сведения о крупных национальных проектах, таких как программы Полигон, Разрезы и др. В итоге не отражена предыстория развития оперативной океанологии в нашей стране. Многие положения оперативной океанологии были развиты в идеологическом смысле и продвинуты в Советском Союзе школами академиков Г.И. Марчука, А.С. Саркисяна, Б.А. Нелепо.

2. Одной из важных задач оперативной океанологии является прогнозирование эволюции гидрофизических полей океана. Однако в диссертации соответствующие вопросы не рассматриваются. Прогностическая система в данной версии содержит только оперативный прогноз параметров ветрового волнения.

3. В модели циркуляции океана коэффициенты горизонтальной вязкости и диффузии имеют большие значения, порядка 10^4 $м^2с^{-1}$. Это определённо приводит к избыточной «линейности» динамики океана. В работе приведено мало иллюстраций, представляющих рассчитанные поля течений, на основании которых можно было бы более достоверно судить об этом эффекте.

4. Используемый подход с заданием в циркуляционной модели речного стока через граничные условия на поверхности воды (по аналогии с осадками) представляется достаточно грубым и его следовало бы заменить условием втока пресной воды через боковые границы.

5. В диссертации для исследования механизмов изменчивости гидрофизических полей применяется разработанная с участием автора модель общей циркуляции океана. Однако при этом не представлены традиционные показатели качества модели (такие как интегральные переносы массы, меридиональные потоки тепла в океане, характеристики экваториальных противотечений и др.), что затрудняет сопоставление модели с другими разработками.

6. При оценках точности восстановления полей в системе усвоения данных применяется только прямое сравнение расчетных значений температуры и солености с наблюдениями (измерения буев Арго). Такая важная характеристика, как соотношение ошибок полученного анализа с изменчивостью, определяемой дисперсией климатических оценок (известной по серии атласов WOA) в работе не представлена.

7. В работе используются независимые модели циркуляции вод и ветрового волнения. Вместе с тем, есть основания полагать, что применение совместной модели эволюции течений и ветровых волн привело бы к более точному описанию обоих процессов в верхнем слое океана.

Отмеченные недостатки не умаляют полученные в диссертации результаты и выводы и не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертационная работа А.А. Зеленько является законченной научно-квалификационной работой, в которой выполнены исследования, имеющие важное научное и прикладное значение, связанные с разработкой физико-математических моделей для моделирования океанических процессов и созданием на их основе технологий мониторинга текущего состояния Мирового океана и прогнозирования его развития.

Диссертация по содержанию и оформлению удовлетворяет действующим требования «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842. В диссертации имеются необходимые ссылки на авторов и источники заимствованных материалов, в том числе – на научные работы соискателя. Автореферат диссертации в достаточной мере отражает ее содержание и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней».

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы» и удовлетворяет требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским

диссертациям, а ее автор, Зеленько Александр Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Отзыв подготовлен на основании заключения совместного заседания Общеинститутского научного семинара и семинара отдела динамики океанических процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН» от 24 сентября 2018 года, протокол № 10.

Научный руководитель Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН», член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор

Коротаев Геннадий Константинович

Ведущий научный сотрудник отдела динамики океанических процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН», доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Шапиро Наум Борисович

Ученый секретарь Общеинститутского научного семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН», кандидат физико-математических наук

Алексеев Дмитрий Владимирович