ОТЗЫВ
официального оппонента
на диссертационную работу А. И. Кубрякова
«Моделирование циркуляции и процессов массопереноса в Черном море в приложении к задачам оперативной океанографии»,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 04.00.22 – геофизика.

Диссертационная работа А. И. Кубрякова посвящена решению задач оперативной океанографии Черного моря на основе использования численных моделей. Рассматриваемые задачи включают в себя исследования динамики и термохалинной структуры вод на различных пространственно-временных масштабах, процессов распространения загрязняющих веществ в бассейне Черного моря, а также разработку и создание оперативных систем диагноза и прогноза состояния морской среды.

Основную задачу оперативной океанографии, а именно диагноз и прогноз состояния моря, можно решить только с привлечением современных численных моделей. С их помощью, используя данные измерений для задания граничных условий, инициализации и ассимиляции, можно восстановить трехмерную структуру морской среды и прогнозировать изменение ее состояния. С этой точки зрения **актуальность** представленных исследований не вызывает никаких сомнений. Более того, важность представленной работы обусловлена еще и тем, что она посвящена и решению проблем обеспечения экологической безопасности Черного моря, порожденным интенсификацией экономической деятельности в его акватории и прибрежной части, связанной с освоением ресурсов шельфа, ростом морских грузопотоков, прокладкой подводных газопроводов, развитием действующих и построением новых портов. Решение этой проблемы диктует необходимость более детального описания гидротермодинамики Черного моря для адекватной оценки состояния морской среды и выявления степени антропогенного воздействия на неё.

Диссертационная работа, общим объемом 399 стр., состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников из 478 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы. Отмечается важность математического моделирования, как одного из основных инструментов исследования динамики Мирового океана, его влияния на климат Земли, его роли в жизни планеты, а также тот факт, что численные модели, описывающие механизмы взаимодействия между элементами морской среды, позволяют выявить основные тенденции и спрогнозировать поведение среды при различных сценариях антропогенного воздействия. Указывается, что, как правило, большинство возникающих при этом задач являются междисциплинарными и требуют внедрения в модели циркуляции, описывающей структуру и изменчивость гидрофизических полей, моделей переноса

загрязняющих примесей и химико-биологической модели. Отмечаются требования, которым должна удовлетворять численная модель циркуляции, нацеленная на использование в системах мониторинга морской среды, а также многообразие существующих в настоящее время моделей высокого уровня, отвечающих этим требованиям, что дает возможность исследователям быть избавленным от довольно громоздкой и рутинной работы по написанию достаточно стандартных процедур и сосредоточить усилия на решении конкретных фундаментальных и прикладных проблем.

Здесь также показана связь работы с национальными и международными научными программами, ее цели, задачи и методы исследования, **научная новизна,** определяющуюся комплексным подходом к исследованиям, и **практическая значимость**, которая подтверждена внедрением результатов работы соискателя для практических нужд как оперативной океанографии, так и конкретных примеров их использования для оценок экологического ущерба. Отмечено, что **апробация** результатов, представленных в диссертации, проведена на 28 международных научных конференциях.

В первом разделе отмечается, что разработка и применение различных моделей для исследования процессов в морях и океанах вызваны сложностью и разнообразием этих процессов, а также наличием особенностей их протекания в открытых и прибрежных областях, при этом, при прочих различиях моделей друг от друга (физические параметризации подсеточных процессов, численная реализация и т.д.), наиболее важным моментом является выбор вертикальных координат. Автор дает краткий обзор основных видов вертикальных координат, используемых в настоящее время в современных моделях морской циркуляции.

Основное содержание раздела посвящено решению задач переноса и распространения загрязняющих примесей в Черном море на основе использования оперативной модели циркуляции МГИ, входящей в состав системы диагноза и прогноза Черноморского Центра мониторинга Черного моря. Предварительно автор приводит описание физико-географических особенностей объекта исследования - Черного моря, а также модели циркуляции МГИ, которая использует геопотенциальные координаты. Далее моделируется сезонный ход фонового (в отсутствие аварийных разливов и сбросов) распределения нефтяных углеводородов в аэробной зоне Черного моря. Для решения поставленной задачи автор добавляет в модель МГИ блок переноса и диффузии примесей, учитывающий наличие трех фракций нефти (тяжелая, средняя и легкая) и химико-биологические процессы окисления нефтеуглеводородов. По результатам проведенных расчетов выявлено пространственно-временное распределение экстремальных величин концентрации нефтеуглеводородов в море и описана роль отдельных фракций в сезонном ходе среднего суммарного вертикального распределения нефтеуглеводородов. Сопоставление с опубликованными данными показало удовлетворительное качество воспроизведения вертикального распределения нефтеуглеводородов и его сезонных изменений в водах Черного моря.

Далее описывается оперативная система прогноза распространения нефтяных разливов в Черном море BlackSeaTrack Web (BSTW), при создании которой использовались оперативная модель циркуляции МГИ и, в качестве прототипа, балтийская система нефтяных прогнозов SeaTrackWeb. Приводятся примеры применения разработанной системы для реальных аварийных ситуаций, при этом продемонстрирована полезность такой опции системы, как "backtracking", т.е. возможность, в дополнение к прямому прогнозу дрейфа нефти, проводить обратный во времени расчет. Несомненно, система BSTW представляет собой современный продукт оперативной океанографии, направленный на осуществление мероприятий по повышению экологической безопасности Черного моря и по спасению на водах.

Модель циркуляции МГИ совместно с моделью переноса и диффузии примесей в последнем подразделе используется для расчета распространения пятна высокого содержания цезия-137 в поверхностном слое Черного моря в первый год после аварии на Чернобыльской АЭС. Эта задача очень важна с экологической точки зрения. Результаты расчетов позволили описать эволюцию радиоактивного пятна и оценить первоначальный уровень концентрации радионуклида.

Во втором разделе автор адаптирует модель Принстонского университета POM к физико-географическим условиям Черного моря. Поскольку модель POM использует сигма-координаты, автор подробно рассматривает проблемы расчета горизонтальных градиентов давления и гидростатической согласованности, возникающие при применении этих координат, дает обзор разработанных к настоящему времени методов снижения ошибок расчета горизонтальных градиентов давления до приемлемого уровня. Далее автор останавливается на отличительных чертах модели POM и её клонов, приводит уравнения модели, описывает их трансформацию при переходе из декартовой системы координат в сигма-координатную систему, схему интегрирования по времени, дискретизацию по пространству, приводит расчетную область и параметры адаптированной сигма-координатной модели, уделяя внимание корректному выбору σ-координатной сетки модели и аппроксимации рельефа дна для удовлетворения условию гидростатической согласованности.

Разработанная авторская версия сигма-координатной модели – основного инструментария диссертационных исследований – используется во втором разделе для исследования динамики гидрофизических процессов во всем бассейне Черного моря. Предварительно модель тестируется на основе расчетов по восстановлению «модельной» климатической сезонной изменчивости гидрофизических полей Черного моря. Следует отметить, что результаты теста продемонстрировали корректность настройки параметров модели, о чем свидетельствует качественно правильное периодическое воспроизведение моделью структуры гидрофизических полей при длительных расчетах с периодическим внешним воздействием. В частности, такая особенность структуры Черного моря, как холодный промежуточный слой (ХПС), не исчезает на протяжении десятилетнего модельного периода. Далее восстанавливается

реальный климатический сезонный ход гидрофизических полей путем ассимиляции в модели климатических данных о температуре и солености.

Полученные данные о климате используются далее при проведении ретроспективного анализа гидрофизических полей Черного моря - одного из наиболее важных продуктов оперативной океанографии. Расчет по модели с ассимиляцией специальным образом подготовленных данных измерений с атмосферным воздействием из ERA40 проведен для более чем за 20-летний период времени. Следует отметить, что реанализ для Черного моря был выполнен впервые. Полученные результаты позволили автору проанализировать межгодовую изменчивость термохалинных и динамических характеристик, а также тенденции в их изменчивости. Наиболее подробно по данным реанализа рассмотрены процессы формирования холодного промежуточного слоя (ХПС) в периоды аномально теплой, нормальной и аномально суровой зим.

Далее результаты реанализа сопоставляются с результатами прогностического расчета при одних и тех же возбуждающих силах. На основе сравнительного анализа делается вывод о том, что созданная модель позволяет проводить гидродинамическую интерполяцию данных наблюдений с целью восстановления истинного состояния Черного моря на масштабах десятилетий.

В конце второго раздела исследуется влияние оптических свойств воды на динамику и стратификацию верхних слоев Черного моря с помощью разработанной версии сигма-координатной модели и биооптической модели, описывающей проникновение коротковолновой радиации в толщу моря. Получено, что введение в модель циркуляции реальных оптических свойств вод приводит к достаточно значимым отличиям в пространственном и временном распределении целого ряда гидрофизических параметров, на основании чего делается вывод о том, что для более точного воспроизведения изменчивости термохалинной структуры и циркуляции вод Черного моря необходим учет и корректное описание в модели циркуляции изменчивости оптических свойств вод.

В третьем разделе для диагностических расчетов циркуляции и описания процессов переноса различного рода загрязнений в прибрежных морских районах используется разработанная версия сигма-координатной модели, а для исследования распресняющего эффекта речного стока во время весеннего половодья на северо-западном шельфе используется модель Михайловой-Шапиро в геопотенциальных координатах.

Предварительно рассматривается проблема постановки граничных условий на жидкой границе. Приводится корректная формулировка задачи, описываются различные подходы, применяемые для решения этой проблемы. Особое внимание уделяется технологии вложенных сеток. Приводятся типы краевых условий на жидкой границе, используемых в работе.

Далее решается задача об определении возможных путей и степени распространения техногенного загрязнения у Южного берега Крыма в результате аварии в 1999 г. судна "Кристина" в Ласпинской бухте. Проводится серия сценарных

диагностических расчетов переноса течениями нефтепродуктов под воздействием ветров различного направления. Приводятся оценки возможных масштабов загрязнений побережья и прилегающих акваторий.

В этом разделе проводится диагностический расчет летней циркуляции в Балаклавской бухте и распространение загрязняющих примесей от источников, расположенных на берегах бухты. Для расчета течений используются данные гидрологических съемок бухты, для задания граничных условий используются данные измерений с автономных буйковых станций. Детально воспроизведено трехмерное поле течений в бухте и особенности распространения загрязнений от каждого берегового источника. Получено, что картина распространения ливневого стока и сточных вод п. Балаклава определяется вертикальной циркуляцией.

Четвертый раздел посвящен Черноморской оперативной системе морских прибрежных прогнозов. Приводится описание архитектуры и технологии функционирования созданной системы морских прибрежных прогнозов, алгоритм прогностических расчетов, алгоритм задания граничных условий на жидких границах областей. Далее описаны результаты тестовых расчетов пилотной версии системы и дальнейшее развитие системы, проведенное в направлении расширения прибрежных областей и унификации используемых локальных моделей. В качестве базовой взята сигма-координатная модель, разработанная автором. Локальные модели инсталлированы в соответствующих причерноморских странах и составляют гидродинамический блок Черноморской оперативной системы морских прибрежных прогнозов. Оперативная крупномасштабная модель циркуляции Морского гидрофизического института (МГИ), лежащая в основе системы диагноза и прогноза состояния всего бассейна Черного моря, обеспечивает необходимыми данными для задания начальных и граничных условий все локальные прибрежные модели через всемирную сеть Интернет. Результатом функционирования Черноморской оперативной системы морских прибрежных прогнозов является однодневный диагноз и трехдневный прогноз трехмерных полей температуры, солености и скорости течений в соответствующем прибрежном районе моря. Приведены примеры валидации системы с помощью данных контактных и дистанционных измерений. Кроме того, в локальные модели циркуляции инкорпорирован блок расчета переноса пассивной примеси. Этот блок активирован в модели для акватории у Южного берега Крыма.

Дополнительно создана подсистема морских прогнозов в расширенной прибрежной акватории, покрывающей всю исключительную экономическую зону Украины.

В последнем подразделе описывается система тренингов по обучению стажеров-исследователей практическим навыкам использования моделей циркуляции для решения задач диагноза и прогноза состояния вод, как во всем море, так и более подробно в отдельных её акваториях. Основу системы составляют сигма-координатные крупномасштабная модель циркуляции Черного моря и локальная прибрежная модель с высоким разрешением, использующие технологию вложенных

сеток. Для прибрежных акваторий автором разработан специальный алгоритм построения локальной модели циркуляции с высоким разрешением для произвольной прибрежной области. Система была апробирована при проведении международных тренингов для молодых специалистов-океанографов.

Следует отметить, что результаты проведенных исследований внедрены в действующие оперативные системы диагноза и прогноза состояния морской среды и распространения загрязнений в море. Диссертационная работа отличается большим объемом выполненных работ, широтой и разносторонностью проведенных исследований.

Проведенные исследования можно рассматривать в качестве решения задачи использования численного моделирования при создании оперативных систем диагноза и прогноза состояния морской среды Черного моря. Не вызывает сомнений высокий научный уровень проведенных исследований, подтверждаемый большим количеством публикаций по теме диссертации в зарубежных и российских реферируемых изданиях.

Тем не менее, имеются следующие замечания, найденные в работе.

1. В первом разделе автор применяет *немонотонную* центрально-разностную схему переноса пассивной примеси, также используемую для переноса тепла и соли, при этом коэффициент диффузии ее меньше, чем у схемы направленных разностей для характерных скоростей течений Черного моря. В этом случае в решении неизбежно должен возникать численный шум. Однако соискатель ничего не пишет об этом и приводит результаты переноса, по-видимому, сглаженные какой-либо фильтрацией. Следует отметить, что в 3-м разделе диссертации автор уделяет особое внимание этой проблеме и строит уже монотонные схемы переноса на основе направленных разностей, которые не генерируют численного шума.

2. Во втором разделе на основе POM строится ***сигма***-модель для исследования климатической изменчивости циркуляции Черного моря. При этом используемый в модели оператор боковой диффузии действует вдоль сигма-поверхностей, что при выбранном пространственном разрешении и коэффициенте диффузии приводит к нефизическому перемешиванию тепла и соли шельфа и глубинной части моря. По-видимому, именно этим обусловлены отличия в температуре и солености между прогнозом и реанализом, показанным, например, на рис. 2.37 и 2.38. Более того, по этим рисункам можно оценить масштаб модельной перестройки термохалинных полей в 10 лет. Простые оценки по выбранному коэффициенту боковой диффузии для Черного моря также дают близкий к 10 годам диффузионной масштаб перемешивания. В работе (Дианский и др, 2002) показано, что для целей климатических исследований в ***сигма***-модели необходимо использовать сложный оператор диффузии, действующий вдоль горизонтальных либо изопикнических поверхностей.

Отмеченные недостатки ни коим образом не повлияли на общую положительную оценку диссертационной работы А.И. Кубрякова, представляющей собой востребованное, выполненное на высоком научном уровне исследование. Автор

является известным специалистом в области моделирования гидротермодинамики Черного моря.

Полученные результаты и выводы в полной мере соответствуют поставленной цели и задачам исследования. Результаты работы достаточно полно отражены в реферируемых научных изданиях.

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Тема исследования соответствует профилю Специализированного ученого совета.

Диссертационная работа написана **хорошим научным языком**, все четко и ясно изложено с использованием принятой терминологии.

Диссертация А.И. Кубрякова является **завершенным научным исследованием,** в котором **получен ряд новых результатов** в области оперативной океанографии Черного моря, имеющих важное фундаментальное и прикладное значение. Сформулированные автором основные результаты работы являются научно обоснованными и способствуют более детальному пониманию происходящих в Черном море процессов.

Полученные результаты уже **внедрены в практику** выполнения оперативных прогнозов состояния морской среды, в обеспечение оперативного контроля экологической безопасности морских акваторий, нашли применение в обосновании претензий к виновникам техногенных катастроф.

Результаты диссертационной работы в дальнейшем могут быть использованы для решения задач морской навигации, обслуживания морских портов, обеспечения безопасности морских хозяйственных операций, а также при разработке программ экологической безопасности Черного моря. Эти результаты, несомненно, будут использованы для развития моделирования циркуляции Черного моря.

Считаю, что диссертационная работа А.И.Кубрякова полностью отвечает требованиям ВАК Минобрнауки Российской Федерации и ВАК Украины, предъявляемым к докторским диссертациям по физико-математическим наукам, а ее автор заслуживает присуждения искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 04.00.22 – «геофизика».

Ведущий научный сотрудник
ФГБУ «Государственный океанографический
институт имени Н.Н.Зубова»
доктор физико-математических наук Н.А. Дианский

« 10 » декабря 2014г.

Подпись Н.А. Дианского заверяю.
Ученый секретарь ФГБУ «ГОИН», к.г.н. Н.В. Жохова