

На правах рукописи

ИВАНОВ Леонид Михайлович

**ВЕРОЯТНОСТНЫЕ АСПЕКТЫ
ПРЕДСКАЗАНИЯ И РЕКОНСТРУКЦИИ
ОКЕАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

25.00.28 — океанология

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

СЕВАСТОПОЛЬ
2004

Работа выполнена в отделе ядерной гидрофизики Морского гидрофизического института Национальной Академии наук Украины

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор

Карлин Лев Николаевич

Доктор физико-математических наук, профессор

Рожков Валентин Алексеевич

Доктор физико-математических наук

Рябченко Владимир Алексеевич

Ведущая организация: Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН)

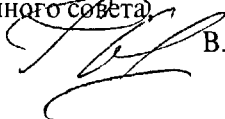
Защита состоится 9 декабря 2004 г. в 13⁰⁰ час на заседании диссертационного совета Д 327.002.01 при Государственном научном центре РФ Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте по адресу: 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНЦ РФ Арктического и Антарктического научно-исследовательского института по адресу:

199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38

Автореферат разослан 22 октября 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат географических наук



В.Ф. Радионов

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. В последние годы в современной океанографии в частности, и в геофизике в целом, наметился подход к анализу динамики океана и атмосферы, сочетающий использование сложных математических моделей и данных наблюдений, собираемых *in situ* и дистанционно с помощью аэрокосмических средств. Идеологически такой подход представляется достаточно очевидным, так как он основывается на следующем, весьма разумном, предположении: априори математические модели по своей природе могут только приближенно отображать процессы, протекающие в атмосфере и океане, а поэтому, чтобы их прогнозировать, модели необходимо периодически "подправлять" данными наблюдений. Подобная идеология используется в большинстве современных климатических и океанографических проектов, таких как, WOCE, CLIVAR и др., направленных на изучение природы и изменчивости погоды и климата.

Практическая реализация такого подхода требует ответа на следующие неочевидные вопросы: (1) как оценивать моменты времени, когда необходимо корректировать модель данными наблюдений; (2) какой объем данных наблюдений и в какой форме необходимо усваивать в модели; и (3) как модель должна быть модифицирована, чтобы добиться максимально возможной продолжительности прогноза.

Ответы на эти вопросы, в первую очередь, должны быть получены в рамках какого-то общего теоретического подхода к анализу модельной предсказуемости. Однако, вследствие сложности объекта исследования [прогностические уравнения динамики атмосферной или океанической циркуляции являются нелинейными, а наблюдаемые в океане и атмосфере динамические режимы (аттракторы) могут быть сильно чувствительными к возмущениям, вносимым в прогностические модели при ассимиляции данных наблюдений], в настоящее время теория, необходимая для анализа модельной предсказуемости, отсутствует. Ответы на вышеуказанные вопросы пытаются получить на основе чисто феноменологического анализа результатов численного воспроизведения определенных конкретных динамических сценариев в океане или атмосфере. Безусловно, эти результаты имеют существенную практическую ценность в каждом конкретном случае, но очень часто мало что дают для развития общей теории предсказуемости. Точное состояние океана или атмосферы неизвестно, так как оно оценивается с помо-



шью приближенных моделей и данных наблюдений, искаженных различными ошибкам, которые часто являются не малыми, и нет никаких гарантий, что модель в конкретных условиях воспроизводит реальные физические режим[ы] в океане, а не некоторые модельные аттракторы, которые являются следствием неопределенностей, возникающих при прогнозировании.

Все это стимулировало в последнее десятилетие развитие общих теоретических подходов к анализу модельной предсказуемости и попыток получения на их основе некоторых общих знаний о фундаментальных механизмах, ограничивающих предсказуемость в атмосфере и океане. Такие работы проводились и проводятся во всех зарубежных и российских центрах, занимающихся разработкой и практической реализацией методов прогнозирования погоды и климата. В бывшем Советском Союзе и в России наиболее важные результаты по прогнозированию океанической циркуляции были получены школой академиков Г.И. Марчука и А.С. Саркисяна и обобщены в фундаментальной монографии (Marchuk & Sarkisyan, 1988). Атмосферная предсказуемость интенсивно изучается академиком Дымниковым В.П. с учениками. Общая концепция их подхода к анализу климатической предсказуемости может быть найдена в работе (Дымников, 1998).

На Западе и, в первую очередь, в США проблема предсказания океанических течений интенсивно исследуется научными школами А. Robinson (Howard University) и J.J. O'Brien (Florida State University). Поэтому актуальность проблемы, рассматриваемой в настоящей диссертационной работе, не вызывает никаких сомнений, а полученные в ней результаты имеют большую практическую значимость.

Цели настоящей диссертации. Цели диссертационной работы Л.М. Иванова: (1) развить оригинальную теоретическую концепцию для анализа предсказуемости сложных геофизических систем и на ее основе разработать практический подход для оценки качества прогнозирования океанических процессов по численным моделям, если возможные источники модельных неопределенностей могут быть параметризованы как стохастические слагаемые; (2) углубить понимание фундаментальных аспектов предсказуемости в океане и понять возможные универсальные механизмы, которые ограничивают модельный прогноз океанической циркуляции на различных пространственно-временных масштабах; (3) на основе концепции предсказуемости, развитой соискателем, разработать метод для практической реконструкции океанических процессов и полей по зашумленным измерениям

с целью его дальнейшего использования для оценок состояния океана, в первую очередь в прибрежных районах Мирового Океана.

Задачи, решенные в диссертации. В диссертационной работе решены следующие теоретические и практические задачи.

1) Разработан оригинальный подход к анализу модельной предсказуемости и реконструкции океанических процессов, основанный на статистической теории первого касания границы.

2) Выведены уравнения, описывающие статистику времени модельного прогнозирования, и предложен итерационный метод решения этих уравнений.

3) С помощью развитого математического аппарата проанализирована предсказуемость нескольких моделей течений, включая аттрактор Лоренца, который в современной научной литературе используется для объяснения принципиальной непредсказуемости атмосферной циркуляции на срок свыше 10—14 дней.

4) Оценено время модельной предсказуемости синоптической черноморской циркуляции, воспроизводимой по океанографической модели Бломберга и Меллора (Принстонский университет), ассимилирующей COAMPS [совместная мезомасштабная модель океана и атмосферы Военно-Морской Исследовательской Лаборатории (Монтерей, США)] ветровые поля и тепловые потоки.

5) Разработан метод оценки качества модельного прогноза в прогностических ансамблях ограниченной размерности.

6) Оценена лагранжева предсказуемость океанографической модели Бломберга и Меллора, использованной для воспроизведения циркуляции в Мексиканском заливе с высоким пространственным разрешением, равным $1/12^\circ$.

7) Идентифицирован режим аномальной диффузии (повышенная предсказуемость) по траекториям реальных RAFOS поплавков, запущенных в Калифорнийское Противотечение в 1992—2004 гг.

8) Разработан эффективный метод реконструкции океанических процессов и полей [метод оптимальной спектральной декомпозиции (МОСД)] по сильно зашумленным данным, имеющим пространственные и временные пропуски.

9) На основе МОСД получены оценки радиоактивного загрязнения Карского и Белого морей изотопами Cs-137 и Sr-90. Рассчитан радионуклидный баланс для этих морей.

10) На основе МОСД реконструирована поверхностная циркуляция в Монтерейской бухте (Калифорния, США) в течение трехлетнего

периода (1999—2001) на пространственной сетке 1.2 км x 1.2 км и изучена динамика спиральных вихрей с характерными масштабами около 10 км.

11) На основе МОСД реконструирована циркуляция в верхнем слое Луизиано-Техасского шельфа (от поверхности до 15 метровой глубины) в течение двухлетнего периода (1993—1994) по измерениям скорости течений на заякоренных притопленных буйах и с помощью поверхностных лагранжевых буйев.

12) Результаты реконструкции были использованы для идентификации нового физического явления на Луизиано-Техасском шельфе, заключающегося в эпизодических изменениях направления шельфового течения (реверс циркуляции) вследствие синоптической ветровой изменчивости.

Основные результаты, выносимые на защиту.

1. Теория для количественного анализа модельной предсказуемости: оригинальная концепция модельной предсказуемости; уравнения, описывающие статистику времени модельной предсказуемости, и итерационный метод для их решения; модель роста ошибки прогноза в представлении Лагранжа.

2. Концепция экстремально успешных прогнозов в океанографическом моделировании и подход для оценивания горизонта модельной предсказуемости в прогностических ансамблях малой размерности. Доказательства существования экстремально успешных прогнозов при воспроизведении циркуляции в Черном море и Мексиканском заливе с помощью Принстонской Океанографической Модели.

3. Метод реконструкции океанических процессов (МОСД) по коротким выборкам наблюдений, искаженных сильными шумами с неизвестной статистикой, и практические оценки радиоактивного загрязнения Карского и Белого морей, временных масштабов и пространственной структуры синоптической и мезомасштабной изменчивости в Монтерейской бухте, статистики синоптического реверса циркуляции на Луизиано-Техасском шельфе, полученные с помощью МОСД.

Новизна и практическая значимость результатов. Автором диссертации предложена новая оригинальная концепция для количественного оценивания времени модельной предсказуемости и развит соответствующий математический аппарат для практической реализации концепции. Теоретически был предсказан, а затем подтвержден с помощью численного моделирования следующий фундаментальный результат, имеющий большое значение для практической океанологии.

Найдено, что динамика течений может быть хорошо предсказуема даже в условиях сильной модельной неопределенности. Индивидуальные прогнозы повышенной продолжительности были названы автором диссертации экстремально успешными прогнозами, существующими на фоне низкой средней предсказуемости. Показано, что именно эти прогнозы определяют модельный горизонт предсказуемости. В диссертации показано, что горизонт модельной предсказуемости может быть определен даже в ансамблях прогнозов малой размерности, не превосходящих 50—100 реализаций. Это теоретически обосновывает практическую возможность идентифицировать экстремально успешные прогнозы в реальном океанографическом моделировании и принципиально улучшить оценки, получаемые в рамках ансамблевых прогнозов в атмосфере и океане.

В диссертации развит эффективный метод для реконструкции океанографических полей по выборкам ограниченного объема. Опыт приложения этого метода к реальным океанографическим полям различной природы (температуре, солености, циркуляции, геохимическим трассерам) доказал его практическую ценность при анализе сильно зашумленных данных, собранных в различных районах прибрежной зоны Мирового океана. В настоящей диссертации этот метод иллюстрируется только тремя практическими примерами. Однако он также был успешно применен к анализу радиоактивности в Черном море (Егемеев et al., 1994, 1995), реконструкции циркуляции в Южном океане (Данилов и др., 2003, 2004) и оценке теплового запаса Северной Атлантики по данным дрейфующих буев ARGOS (Ivanov et al., 2004).

Слабая чувствительность МОСД к уровню шумов, искажающих океанографические наблюдения и к длине выборки этих наблюдений, позволили идентифицировать несколько новых физических явлений в шельфовых зонах Северной Америки. В частности для Луизиано-Техасского шельфа было открыто явление синоптического реверса течений, являющееся важным механизмом в перераспределении биогенных веществ на этом шельфе и сильно влияющее на его биопродуктивность.

МОСД оформлен в виде пакета компьютерных программ, которые используются в Морском Гидрофизическом Институте (Севастополь, Украина), Военно-Морской Школе США (Монтерей, Калифорния) и нескольких университетах США.

За цикл работ по проблеме предсказания поведения геохимических трассеров в океане соискатель [в соавторстве с к.г.-м.н. А.А. Безборо-

довым и академиком АН УССР В.Н. Еремеевым] в 1990 г. был удостоен премии В.И.Вернадского, являющейся высшей наградой Украинской Академии Наук в области геологии, геофизики и гидрофизики. В 2001 он получил премию Национальной Академии Наук США (Award of the National American Academy of Sciences for excellence in field) за цикл работ, посвященных анализу модельной предсказуемости.

Обоснованность и достоверность научных результатов и выводов. Основные ключевые положения диссертационной работы докладывались на 45 научных симпозиумах, конференциях и конгрессах, обсуждались на научных семинарах в Гарвардском университете (Бостон), Массачусетском Технологическом Институте (Бостон), Орегонском университете, Институте Океанологии Российской Академии Наук, Арктическом и Антарктическом Научно-Исследовательском Институте и других западных и российских университетах и научных центрах.

Главные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных журналах, таких как Доклады Академии Наук СССР, Доклады Академии Наук России, Доклады Академии Наук Украины, Изв. АН СССР. Физика Атмосферы и Океана, Морской Гидрофизический Журнал, Journal of the Geophysical Research, Journal of the Atmospheric Sciences, Journal of the Atmospheric and Oceanic Technology, Nonlinear Processes in Geophysics, Journal of Marine Systems, International Journal of Bifurcation and Chaos, Journal of Environmental Radioactivity и др.

Все теоретические результаты, полученные в диссертационной работе, проверялись путем сравнения с численным моделированием или с результатами, полученными независимыми исследователями, с помощью других подходов. Соискатель в своей работе использует современные математические методы теории динамических систем и вероятности, что существенно повышает вероятность достоверности полученных результатов.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из шести глав, введения и заключения. Она включает в себя 4 таблицы и 61 рисунок.

Полнота изложения материалов в публикациях диссертанта. Научные результаты диссертации опубликованы в 1 монографии и 29 статьях в рецензируемых научных журналах и трудах научных конференций. Также результаты диссертационной работы были опубликованы в 20 нецензурируемых сборниках трудов научных конференций и сим-

позиумов и примерно в 50 тезисах различных международных и отечественных конференций.

Материалы диссертации полно отражены в публикациях автора в авторитетных российских, украинских и зарубежных изданиях, соответствующих перечню научных изданий ВАК России: Известия АН СССР, серия "Физика атмосферы и океана"; Доклады Академии Наук СССР; Доклады Академии Наук Украины; Доклады Академии Наук России; Journal of the Geophysical Research, Journal of the Atmospheric Sciences, Journal of the Physical Oceanography, Journal of the Atmospheric and Oceanic Technology, Nonlinear Processes in Geophysics, Journal of Marine Systems, Journal of Environmental Radioactivity, Geophysical Research Letters, Journal of Bifurcation and Chaos и др.

Эти публикации полностью отражают основные выводы диссертации.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации. Постановка всех задач, рассмотренных в диссертации, и их теоретический анализ, включая конкретные аналитические расчеты, осуществлялись лично соискателем. Лично соискателем также выполнены численные расчеты по оценке предсказуемости маломодовых моделей, баротропной модели ветровой циркуляции в полузакрывном бассейне и модели Черного моря. Реконструкция полей радиоактивности цезия и стронция в Черном, Белом и Карском морях выполнены в соавторстве с к.ф.м.н. Т.М. Марголиной, поля циркуляции в Монтерейской бухте и на Луизиано-Техасском шельфе были восстановлены в соавторстве с О.В.Мельниченко. Лагранжева предсказуемость в Мексиканском заливе была исследована совместно с О.В. Мельниченко и Ю.А. Побережным. При решении всех этих задач соискателю принадлежит постановка исследуемой проблемы, выбор метода для ее решения, теоретическая концепция, используемая для анализа, и финальная интерпретация результатов расчетов. Под руководством соискателя было подготовлено и успешно защищено 2 диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: Смелянским В.И. и Марголиной Т.М., а также одна диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (Мельниченко О.В) будет представлена к защите в Специализированном Совете Морского Гидрофизического Института Национальной Академии Наук Украины (Севастополь).

Ниже опишем краткое содержание глав докторской диссертации.

ГЛАВА I. ПРОБЛЕМА ПРЕДСКАЗАНИЯ И РЕКОНСТРУКЦИИ ПРОЦЕССОВ В ОКЕАНЕ

Настоящая глава является обзорной. В ней обсуждаются проблемы предсказуемости в океане и современные теоретические критерии, используемые для количественного оценивания модельной предсказуемости, среднеквадратичная ошибка прогноза, Ляпуновские и Сингулярные вектора, информационные критерии. Рассматриваются стохастико-динамический подход к оцениванию наиболее вероятного прогноза, метод Монте-Карло и метод статистических ансамблей.

Другая важная проблема, обсуждаемая в главе, связана с оцениванием состояния океана по данным наблюдениям, которые очень часто зашумлены и получены на наблюдательной сети, содержащей значительные пространственные пропуски. Как любая проблема оценивания в условиях отсутствия априорной информации о реальном состоянии океана и, в общем, о статистике шумов, искажающих наблюдения, эта задача не имеет единственного решения. В современной океанографии широко применяются метод оптимальной интерполяции и его многочисленные вариации, сплайн-интерполяция, вариационные методы и др. Достоинства и недостатки этих методов подробно обсуждаются в этой главе.

В главе приведен иллюстративный материал, позволяющий понять сложность проблемы оценивания качества моделей, используемых для прогноза состояния атмосферы и океана. Однако необходимо разделять физические, математические и технические (компьютерная реализация) аспекты этой проблемы.

С физической точки зрения, на сегодняшний день, основные механизмы, вызывающие потерю модельной предсказуемости, изучены явно недостаточно. Непонятно, каким образом можно разделить вклады различных источников неопределенностей в ошибку прогноза, какие масштабы наименее или наиболее предсказуемы в океане в каждом конкретном случае численного моделирования.

Численные эксперименты с моделями типа POP (parallel oceanographic program) показали, что, повышая пространственное разрешение разностной сетки, используемой в модели, мы можем более accurately описать динамику пограничных течений в океане и вероятно, низкочастотную моду океанической циркуляции. Однако неясно, спо-

собны ли такие модели аккуратно воспроизводить синоптическую и мезомасштабную изменчивость.

С математической точки зрения, проблема модельной предсказуемости — это проблема чувствительности динамической модели к возмущениям начальных условий и модельных уравнений. Модельные уравнения, как правило, нелинейны, а размерность фазового пространства, после редукции модели в это фазовое пространство, часто достигает нескольких тысяч единиц. Поэтому на сегодняшний день, главным инструментом для исследования модельной предсказуемости является компьютер. Однако даже технические возможности самых современных компьютеров, например, суперкомпьютера Лос-Аламосской лаборатории (США), не позволяют получать прогнозы циркуляции в Мировом океане лучше, чем с шагом 8—10 км, что для многих внутренних морей сравнимо только с радиусом деформации Россби.

Общепринятый в современной метеорологии и океанологии подход для прогноза термогидродинамических характеристик среды — это ансамблевое осреднение. Его использование позволило улучшить прогнозируемость, по сравнению с индивидуальными динамическими прогнозами, примерно на 40—60%. Однако, вследствие своей сложности, современные модели атмосферы и океана, такие как ROP модель или атмосферная модель Европейского Центра Среднесрочного Прогноза Погоды, даже будучи реализованы на современных супермощных компьютерах, требуют нескольких десятков часов компьютерного времени для проведения одного индивидуального краткосрочного прогноза. Поэтому размерность ансамбля прогнозов, не может превышать 30—100. Чтобы сравнить различные ансамбли между собой и оценить качество предсказания, необходимы некоторые критерии, которые слабо чувствительны (робастны) к низкой ансамблевой размерности.

Ясно, что решить проблему оценки модельной предсказуемости без каких-то разумных упрощений в постановке задачи на сегодняшний день просто невозможно. С нашей точки зрения, наиболее привлекательным является подход, комбинирующий численное и асимптотическое оценивание качества модельного прогноза. Один из возможных подходов, использующих такую идеологию, будет рассмотрен в Главах 2 и 4 настоящей диссертации.

Другой важной проблемой, решение которой требуется для практических целей, является реконструкция океанологических процессов и полей по зашумленным измерениям и малым выборкам. В химиче-

ской и биологической океанографии на сегодняшний день собран большой массив разрозненных данных, которые содержат богатую информацию о шельфовых экосистемах. Необходимо переинтерполировать эти данные в узлы равномерной сетки и заполнить пространственно-временные пропуски в данных, прежде чем использовать их для практических оценок.

К сожалению, статистические подходы типа метода оптимальной интерполяции плохо приспособлены для такого анализа, так как они основаны на очень сильных предположениях о статистической структуре реконструируемых океанографических полей, предполагая их временную стационарность и пространственную однородность. Очевидно, что шельфовые процессы не могут быть описаны в таком приближении.

Использование прогностических объединенных гидробиологических моделей для решения проблемы переинтерполяции данных наблюдений в шельфовых районах также сталкивается с рядом сложностей, заключающихся в том, что начальные условия для гидродинамического прогноза и факторы, определяющие прибрежную циркуляцию, известны только приближенно, а биологические модели содержат огромное количество неопределенных свободных параметров. Следовательно, при решении указанной выше задачи простые модельно независимые методы будут предпочтительней в использовании.

В третьей главе диссертации мы обсудим один из подобных методов и продемонстрируем его эффективность на примере реконструкции океанографических полей различной природы.

ГЛАВА II. ПРЕДСКАЗАНИЕ И РЕКОНСТРУКЦИЯ КАК ПРОБЛЕМЫ ПЕРВОГО ДОСТИЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ

В настоящей главе сформулированы основные положения оригинального подхода, развитого в диссертации, к анализу модельной предсказуемости. Автор диссертации показывает, что проблема оценки модельной предсказуемости может быть сформулирована как проблема первого достижения границы случайным процессом. Это позволяет, с одной стороны, существенно упростить математический анализ проблемы предсказуемости, а, с другой стороны, делает воз-

можным использование ряда теоретических результатов, полученных в теории вероятности, статистической радиофизике и физике, для оценивания времени первого достижения границы.

В первом параграфе настоящей главы мы обсуждаем проблему первого достижения границы случайных процессов. Первоначально, проблема первого касания границы была развита в работе Понтрягина, Аденова и Витта, (1933) в статистической радиофизике. Мы делаем акцент на геофизической интерпретации этого подхода и объяснении того, как он может быть использован для оценивания некоторого установившегося состояния океана. В частности, общая вероятностная концепция подхода иллюстрируется оценкой вероятности ARGO буя перейти из субполярного в субтропический круговорот в Северной Атлантике.

Важное практическое приложение концепции первого касания границы — это введение специальной меры качества модельного прогноза — времени модельной предсказуемости, определяемого как временной промежуток внутри которого точность модельного прогноза ни разу не была хуже заданной точности (irreversible prediction time). Статистические свойства этого критерия обсуждаются в параграфе 2. Нам представляется, что с теоретической точки зрения, наиболее важными статистическими характеристиками времени модельной предсказуемости для решения практических задач являются кумулятивная функция плотности распределения, и моменты этого времени. Также обсуждаются соотношения между временем модельной предсказуемости и e-folding и doubling временами.

Третий параграф является центральным для настоящей главы. Здесь показано, что кумулятивная функция плотности распределения времени модельной предсказуемости удовлетворяет обратному уравнению Фоккера-Планка-Колмогорова, а среднее время предсказуемости — уравнению Понтрягина-Колмогорова-Стратоновича, если неопределенность динамических модельных уравнений может быть параметризована как случайные "силы". Уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова и Понтрягина-Колмогорова-Стратоновича являются линейными дифференциальными уравнениями в частных производных. Для решения этих уравнений могут быть эффективно использованы итерационные методы, позволяющие получить аналитические оценки модельной предсказуемости.

Вообще возможность получать аналитические оценки предсказуемости для нелинейных моделей является сильным аргументом в пользу

развиваемого диссертантом подхода в сравнении с подходами, использующими Ляпуновские экспоненты или сингулярные вектора, которые практически всегда рассчитываются только численными методами.

В четвертом параграфе анализируются методы, позволяющие получать аналитические решения уравнений, описывающих эволюцию кумулятивной функции времени модельной предсказуемости и среднего значения этого времени.

Асимптотические решения могут быть построены в двух предельных случаях. Во-первых, в предположении, что модельная неопределенность слабая (приближение слабого шума). В этом случае мы предлагаем воспользоваться набором асимптотических решений, построенных с помощью ВКБ метода для уравнений, описывающих время первого достижения границы (Matkowsky & Schuss, 1977; Matkowsky et al., 1983; Маслов и др., 1987).

Во-вторых, асимптотические решения могут быть построены, если неопределенность достаточно сильная. Основываясь на идее акад. А. Дородницына о возможности построения асимптотических решений дифференциальных уравнений с частными производными с помощью метода переменного малого параметра, автор диссертации развил эффективный метод для решения уравнения Понтрягина-Колмогорова-Стратоновича.

Выводы. Настоящая глава диссертации содержит обсуждение теоретических аспектов оригинального подхода к проблеме оценки времени предсказуемости для океанографических моделей. Этот подход был предложен диссертантом в работе Ivanov et al., (1994) и в дальнейшем развит в Ivanov et al., 1999; Ivanov&Margolina, (1999); Chu & Ivanov, (2002); Chu et al., (2002); Chu & Ivanov, (2004).

Проблема предсказания в океанографии была сформулирована как проблема первого достижения границы, некоторым случайным процессом. Центральную роль в таком подходе играет время модельной предсказуемости, вероятностные статистики которого удовлетворяют обратному уравнению Фоккера-Планка Колмогорова и уравнению Понтрягина-Колмогорова-Стратоновича.

Модельная предсказуемость может быть изучена аналитически в двух случаях. Во-первых, если стохастическая сила, параметризующая модельную неопределенность в уравнении для статистики времени модельной предсказуемости, является слабой. Здесь, используя прямую аналогию между нашим подходом к анализу модельной предсказуемости и подходом, развитым для оценки стохастической стабильно-

сти динамических систем в Freidlin & Wentzell (1998), асимптотические оценки для времени модельной предсказуемости могут быть построены с использованием ВКБ приближения.

Во-вторых, если стохастическая сила не является слабой, итерационный подход к решению Понтрягина-Колмогорова-Стратоновича может быть чрезвычайно полезен для конструирования приближенных аналитических решений. Один из вариантов такой итерационной техники был развит автором настоящей диссертации в Ivanov et al., (1999); Chu et al., (2002).

ГЛАВА III. МЕТОД ОПТИМАЛЬНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

В настоящей главе мы обсуждаем новый оригинальный метод (метод оптимальной спектральной декомпозиции), который показал свою высокую эффективность при реконструкции океанологических полей различной природы по наблюдениям, содержащим высокий процент шума, и выполненных на океанографических станциях, расположенных неравномерно внутри какого-то региона (Еремеев и др., 1991; Eremeev et al., 1995; Ivanov & Margolina, 1996; Данилов и др., 1996; Chu et al., 2003; и др.). Хотя в настоящее время имеется значительное число подходов различного уровня сложности для решения проблемы реконструкции океанологических полей по данным наблюдений (большая часть из этих подходов обсуждается в Главе I настоящей диссертации), совершенно очевидна необходимость развития специальных методов для анализа данных наблюдений в прибрежных районах Мирового океана, где качество данных наблюдений достаточно низкое (большие измерительные ошибки и значительные пропуски в сети наблюдений) (Рожков, 2001; 2004). Настоящая глава посвящена обсуждению теоретических аспектов метода оптимальной спектральной декомпозиции.

Основные идеи, на которых основан МОСД, обсуждаются в первом параграфе главы. Автор диссертации использует спектральное представление для реконструкции океанографических процессов и полей и сводит эту проблему:

а) к нахождению подходящей системы базисных функций, которые должны быть использованы для спектрального представления полей. При конструировании таких базисных функций должна быть учтена различная априорная информация о характеристиках самого океанографического поля и геометрии области, в которой осуществляется реконструкция;

б) к оценке оптимального количества базисных функций, позволяющих получить спектральное представление реконструируемого поля с необходимой точностью, определяемой уровнем шума, который искажает измерения, степенью неоднородности сетки наблюдений и свойствами самого реконструируемого поля;

в) к разработке регуляризирующего алгоритма для решения вариационной проблемы по определению спектральных коэффициентов. Фактически этот алгоритм должен позволить отобрать оптимальное решение со специальными статистическими и динамическими свойствами.

г) к формулировке априорных ограничений для уточнения найденного оптимального решения.

Проблема выбора базисных функций обсуждается во втором параграфе диссертации в предположении, что на замкнутой границе области нормальная составляющая скорости течения равна нулю. В случае, когда нормальная и касательная компоненты скорости на открытой границе расчетной области не известны, автор диссертации вводит геометрические базисные функции Фурье, которые находятся как собственные функции плоского оператора Лапласа, рассчитываемые с учетом геометрии области. В случае прямоугольной или квадратной геометрии расчетной области эти базисные функции переходят в классические полиномы Фурье.

Если две или одна компоненты скорости течения известны на открытой границе, базисные функции находятся как собственные функции плоского оператора Лапласа, рассчитываемые с учетом геометрии области и знания скорости на ее открытой границе. В этом случае на открытой границе формулируются граничные условия третьего рода. Обсуждается обобщение развиваемого подхода на случай многосвязных областей.

В третьем параграфе настоящей главы обсуждается отбор оптимального решения (реконструируемого поля). Это очень важный параграф, потому что зашумленным наблюдениям обычно соответствуют, как минимум, несколько вариантов реконструированного поля, кото-

рые в определенном смысле являются оптимальными. Принципиальная задача состоит в отборе необходимого оптимального решения без потери тех свойств поля, которые хотелось бы извлечь из измерений.

Это можно сделать, (а) определяя оптимальное число базисных функций в спектральных разложениях (простейшая регуляризация) или (б) вводя какую-то статистическую регуляризацию при определении неизвестных спектральных коэффициентов. Для определения оптимального количества базисных функций автор диссертации предлагает использовать информационный критерий, впервые предложенный Вапником-Червонкисом (1971). Этот критерий легко интерпретируется и выводится в рамках концепции первого достижения границы.

В этом же параграфе обсуждается специальный регуляризирующий алгоритм, разработанный автором диссертации для отбора оптимального решения. Этот алгоритм обладает важным свойством, которое часто является принципиальным при решении практических задач. В сравнении с хорошо известными подходами, основанными на идеях академика В.Тихонова, когда вводится специальный регуляризирующий параметр (точный выбор параметра возможен только в том случае, если известна статистика шума, искажающего измерения), этот алгоритм — (а) саморегулирующийся и (б) не требует знания статистики измерительного шума. Свойство саморегуляризации заключается в следующем. Если устойчивость получаемого решения, высока, алгоритм дает решение, совпадающее с классическим методом наименьших квадратов. В противоположном случае автоматически "включается" регуляризация, минимизирующая норму искомого решения.

В четвертом параграфе настоящей диссертации обсуждается проблема заполнения пространственных пропусков в наблюдательной сети с помощью МОСД. Автор диссертации демонстрирует, что максимальный размер пропуска ("дырки"), который может быть заполнен с помощью этого метода, зависит от уровня шума, искажающего измерения, размера оригинальной "дырки" и характерного пространственного масштаба изменчивости реконструируемого океанографического поля.

Выводы. В настоящей главе мы обсудили математические аспекты метода оптимальной спектральной декомпозиции, развитого автором настоящей диссертации, для реконструкции океанографических полей и процессов по зашумленным измерениям. Практическая реализация этого метода потребовала последовательного решения следующих задач: (а) конструирования специальных базисных функций для облас-

тей со сложной (иррегулярной) формой границы, а также для многосвязных областей, (б) развития специальных регуляризирующих алгоритмов для отбора (селекции) соответствующего оптимального решения.

Мы ввели новый класс базисных функций, названных нами геометрическими базисными функциями Фурье, для определения которых, как минимум, необходимо знание геометрии расчетной области. Эти функции выбираются таким образом, чтобы автоматически удовлетворить соответствующим физическим граничным условиям для скорости течения на жидкой и твердой границах.

Был предложен специальный регуляризирующий алгоритм для отбора оптимальных решений при реконструкции океанографических процессов и полей. Главные достоинства этого алгоритма: (а) его использование не требует знания статистических свойств шумов искажающих наблюдения; (б) регуляризационные решения слабо зависят от изменений интенсивности шума и длины выборки наблюдений. Эмпирически установлено, что если безразмерное отношение шум/сигнал для наблюдений не превосходит 1, то метод оптимальной спектральной декомпозиции позволяет эффективно восстанавливать океанографические поля. Если же безразмерное отношение превосходит 1, то метод достаточно эффективен в случае, когда ошибка измерений имеет гауссовскую статистику.

ГЛАВА IV. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

Метод оптимальной спектральной декомпозиции существует более 10 лет. В течение этого времени автор настоящей диссертации, его ученики (под руководством Л. М. Иванова защищены две диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук и одна диссертация подготовлена к защите), сотрудники ряда американских университетов и Английского Океанографического центра (Southampton, the United Kingdom), успешно использовали МОСД для решения разнообразных практических задач. Здесь рассматриваются только некоторые приложения метода. Мы ограничились тремя примерами: оценкой загрязнения Карского и Белого морей изотопами

Cs-137 и Sr-90, реконструкцией поверхностной циркуляции в Монтерейской бухте (Калифорния, США) по измерениям характеристик поверхностного волнения высокочастотным радаром и циркуляции в верхнем 15-метровом слое Луизиано-Техасского шельфа (Техас, США), где скорости течений измерялись с помощью датчиков, установленных на заякоренных буйках. Высокая нечувствительность (робастность) метода оптимальной спектральной реконструкции к качеству данных позволила в этих случаях реконструировать достаточно сложную пространственно-временную структуру полей по разреженным данным или сделать статистически значимые интегральные оценки радиоактивного загрязнения морей.

В первом параграфе главы рассмотрена общая методология оценки загрязнения Карского и Белого морей радионуклидами Cs-137 и Sr-90 техногенного происхождения. Сформулирована вариационная задача для определения интегрального содержания радионуклидов в этих морях и различных потоков изотопов, поступающих в моря вместе с речным стоком, через проливы, соединяющие их с другими морями Арктического региона. Радионуклидные балансы в этих морях оценены для Cs-137 и Sr-90, находящихся в растворенной форме, и для Cs-137, аккумулированного морской взвесью. Особое внимание уделено оценке потоков радионуклидов в растворенной форме от контейнеров с радиоактивными отходами, затопленных бывшим СССР на мелководье Карского моря. При оценивании радиоактивного содержания Карского и Белого морей были использованы измерения концентраций радионуклидов, проведенные в 1985 г. в Белом море НПО "Тайфун" и в 1993—1994 гг. в Карском море российско-норвежской международной экспедицией.

Результаты наших расчетов позволяют сделать следующие важные практические выводы. Оказалось, что Карское море (по состоянию на 1994 г.) было загрязнено техногенными радионуклидами значительно меньше, чем, например, Черное или Балтийское моря. Этот факт объясняется хорошей "вентиляцией" моря через открытую границу с Северным Ледовитым океаном.

Наибольшее количество радиоактивных загрязнений, около 54 ТБк/год поступает в это море из Баренцева моря через пролив Карские ворота и только около 6 ТБк/год с речным стоком. Отношение $h = \text{Cs-137/Sr-90}$, также очень различно для баренцевоморской воды и вод рек Енисей и Обь. Речные воды существенно более загрязнены радионуклидами стронция ($h = 0.5$). В то же время более соленые барен-

цевоморские воды, поступающие через Карские ворота, имеют высокое содержание цезия ($h = 2.36$). Заметим, что наши расчеты не показывают сколько-нибудь значительного поступления изотопов в морскую воду от затопленных контейнеров с радиоактивными отходами.

Совместный анализ h и пространственного распределения концентрации поля SiO_2 на поверхности моря [на основе данных, собранных в ходе экспедиции "Север-35" (1983 г.)] позволил детектировать речные водные массы вдали от устьев рек Обь и Енисей, что подтверждает гипотезу о слабом вертикальном перемешивании в этом море, по крайней мере, в зимний период подо льдом.

Для Белого моря наши оценки показали, что главный источник радиоактивного загрязнения этого моря — баренцевоморская вода, поступающая через пролив Горло Белого моря. В целом, в Белом море наблюдается процесс накопления радионуклидов Cs-137 , которые эффективно связываются на взвеси и осадках. Важный вывод, следующий из наших расчетов — в море не содержится никаких других источников радионуклидов, кроме природного происхождения.

Во втором параграфе настоящей главы содержатся результаты реконструкции поверхностной циркуляции в Монтерейской бухте (Калифорния, США) по измерениям характеристик ветрового волнения с помощью высоко-частотного радара наземного базирования (CODAR). Главное достоинство радара состоит в том, что он позволяет проводить одновременные измерения с высоким разрешением по пространству (менее 1 км) и времени (примерно каждые 30—60 минут) в областях большого размера в течение длительных промежутков по времени (1—2 года). Его принципиальный недостаток — это то, что измерения содержат значительные случайные и систематические ошибки и часто, вследствие технических причин, в радарном покрытии образуются достаточно большие пространственные пропуски.

Два набора радарных наблюдений в Монтерейской бухте, собранных с трех радарных станций: 30-дневный ряд наблюдений с 2-х часовым шагом по времени в августе 1994 г. и двухлетний ряд наблюдений с 60 минутным шагом по времени в 2000—2001 гг., были использованы в реконструкционных целях. В обоих случаях мы реконструировали поверхностную циркуляцию на сетке 2 км x 2 км, что позволяло воспроизвести спиральные мезомасштабные вихри (характерный размер 10—15 км), часто наблюдаемые в этом регионе на температурных и оптических снимках, получаемых из космоса.

Результаты реконструкции свидетельствуют о существовании в Монтерейской бухте, как одиночных спиральных вихрей, так и вихревых диполей и триполей, которые обычно генерируются в областях с наибольшими градиентами топографического рельефа. Целью настоящей диссертации не являлось детальное изучение динамических и статистических свойств этих вихревых структур. Возможность реконструкции таких вихрей с помощью метода оптимальной спектральной декомпозиции еще раз подчеркивает высокую эффективность метода в применении к зашумленным измерениям на наблюдательной сетке, содержащей значительные пространственные пропуски.

В последнем, четвертом, параграфе главы высокая эффективность МОСД иллюстрируется через реконструкцию циркуляции на Луизиано-Техасском шельфе по данным, собранным на заякоренных океанографических буях в ходе эксперимента LATEX-A (Texas-Louisiana Shelf Physical Oceanography Program) в 1993—1994 гг., и с помощью поверхностных Лагранжевых поплавков, запущенных в этот район по программе SCULP-I (Surface Current and Lagrangian Drift Program) примерно в то же время. Целью натурных экспериментов являлась оценка межгодовой и сезонной изменчивости циркуляции на шельфе и идентификация механизмов ее генерации. Хотя Луизиано-Техасский шельф — это один из наиболее изученных регионов Мирового океана, многие механизмы переноса и перемешивания на шельфе до сих пор не достаточно понятны.

На основании результатов реконструкции циркуляции в верхнем поверхностном слое удалось обнаружить новое физическое явление, заключающееся в том, что циркуляция на шельфе периодически меняет свой знак на противоположный (циркуляционный реверс).

В целом, в осенне-зимний период на шельфе наблюдалась достаточно устойчивая циклоническая циркуляция, генерируемая северо-восточными ветрами. Однако под действием локального вдольберегового ветра ее направление эпизодически менялось на противоположное. Основываясь на результатах реконструкции циркуляции на Луизиано-Техасском шельфе, можно сделать два общих вывода о свойствах реверса прибрежной циркуляции. Во-первых, это чисто пороговое явление, возникающее, когда скорость вдольберегового ветра превышает некоторое критическое значение (заметим, что для этого ветер должен быть сильнее 3—4 м/с). Во-вторых, по-видимому, изменение направления вдольберегового ветра вызывает реверс циркуляции. Все другие динамические факторы, такие как речной сток или взаимо-

действие крупномасштабных вихрей и шельфовой циркуляции, могут изменять только величину порога для реализации реверса.

Вероятность реализации циркуляционного реверса на Луизиано-Техасском шельфе удовлетворяла закону Пуассона, и один реверс приходился в среднем примерно на 12 дней. Простая модель, входным параметром которой являлась скорость вдольберегового ветра, была предложена и верифицирована для предсказания циркуляционных реверсов на шельфе.

Выводы. В настоящей главе мы продемонстрировали несколько практических приложений метода оптимальной спектральной декомпозиции к различным измерениям, чтобы реконструировать пространственно-временную структуру океанографических полей в шельфовых областях и внутренних морях. Результаты настоящих расчетов позволяют сделать несколько общих выводов о потенциальных возможностях метода в приложении к решению океанологических задач, когда состояние океана оценивается по зашумленным измерениям, собранным в наблюдательной сети, имеющей значительные пространственные пропуски.

Прежде всего, надо отметить, что это предполагалось априори, МОСД будет использован в тех географических районах, где традиционные гипотезы о статистической однородности и стационарности исследуемых полей не выполняются. В этом случае, безусловно, целесообразность использования такого популярного в океанологии метода, как оптимальная интерполяция, вызывает большие сомнения. Метод оптимальной спектральной декомпозиции не требует определения каких-то статистических весов и поэтому более пригоден к "работе" в таких условиях. Во-вторых, он позволяет эффективно заполнять пространственные пропуски в данных наблюдений. Частные примеры, приведенные в настоящей главе, подтверждают этот вывод.

Внимательно анализируя результаты по реконструкции поверхностной циркуляции в Монтерейской бухте и на Луизиано-Техасском шельфе, можно заметить, что если структура полезного сигнала в данных наблюдений проявляется отчетливо, то в этом случае МОСД позволяет реконструировать поле даже тогда, когда измерения отсутствуют примерно в половине исследуемой области.

Другое достоинство МОСД — это то, что за счет соответствующего подбора базисных функций, реконструируемые поля автоматически удовлетворяют физическим граничным условиям на открытых и

твердых границах исследуемой области. Метод оптимальной интерполяции, например, не обладает таким свойством.

Метод оптимальной спектральной декомпозиции сравнивался с методами оптимальной интерполяции и сплайн-интерполяции на различных тестовых задачах. Детали такого сравнения не приведены в настоящей главе, но легко могут быть найдены в статьях Ivanov et al., (2001), Chu et al., (2003). Кратко суммируя эти результаты, мы можем утверждать, что МОСД уступает по точности оптимальной интерполяции, если корреляционная функция реконструированного поля и статистика измерительных шумов известны точно. В противоположном случае, оптимальная спектральная декомпозиция дает превосходящие по точности результаты и часто позволяет реконструировать более разумные с физической точки зрения поля, даже тогда, когда оптимальная интерполяция дает откровенно не верные результаты. В сравнении со сплайн-интерполяцией метод оптимальной спектральной декомпозиции более эффективен, когда отношение шум/сигнал для данных наблюдений не мало.

Все эти свойства позволяют рекомендовать использовать метод оптимальной спектральной декомпозиции для анализа данных наблюдений, которые (а) сильно зашумлены и (б) содержат значительные пространственно-временные пропуски.

В первую очередь, мы видим большие перспективы в использовании МОСД для реконструкции пространственных распределений биологических и химических субстанций в шельфовых районах Мирового океана. Здесь, вклад плохого качества данных и достаточно коротких выборок наблюдений в ошибку реконструкции может быть значительно уменьшен, за счет способности метода оптимальной спектральной декомпозиции фильтровать неопределенности, обусловленные обоими факторами.

ГЛАВА V. ЭКСТРЕМАЛЬНО УСПЕШНЫЕ ПРОГНОЗЫ

В настоящей главе мы обсуждаем одну из фундаментальных проблем теории предсказуемости — какие факторы могут ограничивать предсказуемость океанических течений на масштабах от нескольких недель до нескольких месяцев. Впервые такая проблема обсуждалась

американским ученым Lorenz, (1963,1984) применительно к предсказанию состояния атмосферы. Анализируя поведение различных динамических систем малой размерности, Лоренц пришел к выводу о принципиальной непредсказуемости атмосферной циркуляции на срок более 10—14 дней. Он предположил, что атмосфера находится в режиме так называемого странного аттрактора, для которого в среднем характерен быстрый (экспоненциальный) рост ошибки прогноза с течением времени, даже если в начальный момент времени эта ошибка была мала. Поэтому реальная атмосферная динамика должна быть принципиально не предсказуемой на длительные сроки.

Такой подход, несмотря на его внутреннюю логику и возможность проверки через численное моделирование на основе различных динамических систем малой размерности и больших атмосферных прогнозических моделях, не может быть автоматически перенесен на случай океана по следующим причинам. Прежде всего, необходимо отметить, что нет никаких оснований считать, что динамический режим океана — это странный аттрактор, использованный Лоренцем для объяснения эффекта атмосферной непредсказуемости. Более вероятно и правдоподобно, предположить существование в океане набора различных динамических режимов (аттракторов) и переходов между ними вследствие вариации сил, генерирующих циркуляцию в океане. По крайней мере, на это указывают результаты по исследованию предсказуемости с помощью упрощенных баротропных моделей океана. Естественно, что странный аттрактор, открытый Лоренцем, может являться только одним из возможных динамических режимов океана.

Фактически Лоренц исследовал случай, когда модельная предсказуемость атмосферных течений теряется вследствие роста ошибки, содержащейся в начальных данных. Этот случай наиболее типичен для прогноза циркуляции в атмосфере. Для аккуратного численного прогноза динамики океана существенную роль играет удачный выбор параметризаций явлений, не разрешаемых явно на расчетной сетке: вихрей, волн, турбулентности в придонном и поверхностном турбулентных слоях, мезомасштабной конвекции и т.п. Ошибка прогноза, обусловленная неточностью параметризационных схем, может иметь поведение, отличающееся от экспоненциального роста начальной ошибки.

Цель настоящей главы — показать на основе анализа предсказуемости знаменитого аттрактора Лоренца, простой модели баротропной циркуляции, генерируемой ветром и потоком импульса через от-

крытую границу, во вращающемся бассейне и трехмерной модели Черного моря, основанной на примитивных уравнениях и ассимилирующей псевдо-реальные ветер и тепловые потоки между атмосферой и морем, что картина предсказуемости описанная Лоренцем не является единственной, и что в условиях Мирового океана могут наблюдаться другие предсказательные режимы.

В первом параграфе настоящей главы вводится новое понятие для океанографии и метеорологии — экстремально успешный прогноз. Экстремально успешный прогноз — это индивидуальный прогноз очень большой (аномальной) продолжительности по численной модели, даже если в среднем ансамблевый прогноз, реализуемый с помощью этой модели, очень короткий.

В реальности индивидуальные прогнозы большой продолжительности часто наблюдаются в численных экспериментах с океанографическими моделями.

Повышенную модельную предсказуемость обычно объясняют удачным выбором модельных свободных параметров, таких как коэффициенты в параметризационных схемах и т.п. По нашему мнению, эффект повышенной предсказуемости численной модели является фундаментальным свойством, следующим из того факта, что устойчивость модели к возмущениям начальных условий и динамических уравнений, обладает свойством перемежаемости, т.е. промежутки времени, когда предсказуемость модели высока, чередуются с промежутками времени, внутри которых модель демонстрирует низкую предсказуемость.

Экстремально успешные прогнозы наблюдаются, когда функция распределения критерия, используемого для оценки предсказуемости (времени предсказуемости, скорости роста ошибки прогноза) теряет свою симметрию, т.е. у этой функции распределения появляется длинный "хвост", вытянутый в область больших времен предсказания. В настоящем параграфе объясняется фундаментальный механизм потери симметрии функции распределения времени модельной предсказуемости для странных аттракторов и квазиаттракторов, представляющих собой набор аттракторов с различными свойствами устойчивости и находящихся в малой области фазового пространства.

Во втором параграфе настоящей главы мы иллюстрируем общую теоретическую концепцию на примере трехмодового аттрактора Лоренца. На основе аналитических решений уравнения Понтрягина-Колмогорова-Стратоновича и численных экспериментов с моделью Лоренца было установлено, что:

— во-первых, предсказуемость аттрактора Лоренца сильно зависит от пространственной ориентации начальной ошибки, и существует набор ориентации начальной ошибки, для которых аттрактор Лоренца демонстрирует достаточно хорошую предсказуемость. В последнем случае, время предсказуемости примерно в 6—7 раз больше, чем среднее время предсказуемости, оцененное Lorenz, 1963;

— во-вторых, вероятность того, что время предсказуемости аттрактора Лоренца t превышает длину временного промежутка T , удовлетворяет экспоненциальному закону с экспоненциальным показателем, равным отношению $-T/\langle t \rangle$, где $\langle t \rangle$ — среднее время модельной предсказуемости. Этот закон был получен в диссертационной работе аналитически и проверен с помощью численного моделирования.

Заметим, что среднее время модельной предсказуемости может быть с хорошей точностью оценено из ансамбля прогнозов малой размерности. Его знание позволяет оценить фундаментальную характеристику предсказуемости — горизонт предсказуемости, определяющий максимально возможную предсказуемость для модели при заданном уровне шумов в начальных условиях и модельных уравнений.

Поэтому, по крайней мере, для аттрактора Лоренца, вероятность экстремально успешного прогноза может быть оценена из ансамбля прогнозов малой размерности. Наши оценки показывают, что для этого достаточно ансамбля с размерностью ~ 50 . В настоящее время ансамбли такой размерности реализуются в атмосферных и океанографических моделях, используемых для целей оперативного прогноза.

В третьем параграфе концепция экстремально успешных прогнозов проверяется с помощью предсказания баротропной циркуляции, генерируемой ветром и потоком импульса через открытую границу во вращающемся крупномасштабном бассейне. Принстонская Океанографическая Модель (ПОМ) используется для моделирования эволюции такой циркуляции на временных промежутках порядка 2—2.5 месяца. Устойчивость модели к возмущению начальных условий, ветра и нормальной компоненты скорости на открытой границе исследовалась методом Монте-Карло в ансамбле реализаций, размерность которого равна 1000.

Результаты наших расчетов показывают, что плотность вероятности времени модельной предсказуемости симметрична для белого шума, искажающего начальные условия. Однако для шумов с конечным радиусом корреляции такой симметрии уже не наблюдается. С

увеличением радиуса шума "хвост" плотности вероятности вытягивается в область больших времен предсказания.

В случае возмущения касательного напряжения трения и/или нормальной составляющей скорости на открытой границе белым гауссовским шумом, симметрия плотности вероятности времени модельной предсказуемости вообще не наблюдалась. В зависимости от интенсивности шума и выбранного уровня приемлемой точности прогноза, наблюдался каскад различных режимов предсказуемости, описываемых с помощью различных типов несимметричных плотностей вероятности. Это позволило классифицировать моделируемый динамический режим в бассейне как квазиаттрактор, который устроен таким образом, что малые возмущения модельных уравнений вызывают переходы между аттракторами, обладающими различными степенями устойчивости.

Хотя основные теоретические результаты, позволяющие детектировать экстремально успешные прогнозы, были получены в ансамбле высокой размерности, кумулятивная функция времени модельной предсказуемости была также оценена в низкоразмерных ансамблях, когда их размерность не превышала 50. Для этих целей был использован математический аппарат L- моментов.

Численные расчеты показали, что даже в случае статистических ансамблей с размерностью, не превышающей 50, кумулятивная функция времени модельной предсказуемости оценивается достаточно accurately. Зная эту функцию, мы можем легко оценить модельный горизонт предсказуемости. Это открывает широкую перспективу применения наших теоретических результатов для интерпретации реальных океанографических прогнозов, полученных по трехмерным бароклинным моделям океанической циркуляции.

В последнем, четвертом параграфе настоящей главы, концепция экстремально успешных прогнозов была применена для анализа предсказуемости Черноморской циркуляции на основе ROM, ассимилирующей COAMPS ветер и тепловые потоки.

ROM использует батиметрические фильтры для сглаживания реальной донной топографии, что приводит к значительным ошибкам прогноза при моделировании сезонного поведения циркуляции в Черном море, где мезомасштабная вихревая изменчивость, в первую очередь, обусловлена значительными градиентами топографии. Чтобы улучшить модельный прогноз, ROM ассимилировала аномалию уро-

венной поверхности, измеряемую со спутников TOPEX/POSEIDON и ERA-1/2.

Численные расчеты продемонстрировали, что в среднем время прогноза циркуляции в верхнем 100-метровом слое не превышало двух недель. Однако экстремально успешные прогнозы имели длительность до 40—50 суток.

Выводы. В настоящей главе мы применили концепцию первого достижения границы для оценки времени модельной предсказуемости нескольких моделей различного уровня сложности, чтобы достигнуть некоторого понимания фундаментальных механизмов, ограничивающих прогноз.

Мы нашли, что в случае странного аттрактора и квазиаттрактора, независимо от модели, используемой для прогноза, функция плотности распределения времени модельной предсказуемости является несимметричной и имеет "хвост", формируемый относительно редкими прогнозами большой (аномальной) продолжительности. Эти прогнозы были названы нами экстремально успешными прогнозами. Их длительность значительно превышает длительность среднего ансамблевого прогноза, и они могут быть использованы как "эталон" (горизонт предсказуемости) конкретной океанографической модели.

В настоящей диссертации не решалась задача повышения вероятности реализуемости экстремально успешных прогнозов для конкретных океанографических моделей, что, безусловно, очень важно для практических приложений. Однако здесь доказано, что горизонт модельной предсказуемости может быть оценен для ансамблей прогнозов с размерностью, не превышающей 50—100. Таким образом, максимально возможная длительность прогноза, которая потенциально может быть получена при решении конкретной прогностической задачи в рамках конкретной прогностической модели, может быть оценена для реальных океанографических моделей с помощью развитого в диссертационной работе подхода. Эта характеристика имеет фундаментальное значение для практики.

Заметим также, что развиваемый подход является модельно независимым, т.е. может быть использован для анализа любой прогностической модели любого уровня сложности. Возможные потенциальные приложения подхода — прогнозирование дрейфа льда в Северном Ледовитом океане, детектирование аномальных режимов в гидрологии

различных морей и океанов (например, таких катастрофических явлений, как большая соленостная аномалия, наблюдавшаяся в Северной Атлантике) и многое другое.

ГЛАВА VI. ПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ В ПРЕДСТАВЛЕНИИ ЛАГРАНЖА

В настоящей главе обсуждается важный вопрос оценки времени модельной предсказуемости в представлении Лагранжа. Хотя формально представления Эйлера и Лагранжа равноценны при описании динамики течений, существенные различия между ними возникают в случае проведения осреднения по ансамблю прогнозов. Поэтому можно ожидать, что времена предсказуемости в представлениях Лагранжа и Эйлера могут отличаться друг от друга достаточно значительно. Траектории лагранжевых частиц чрезвычайно чувствительны даже к мелкомасштабным особенностям в пространственно-временной структуре циркуляции, обычно рассчитываемой в представлении Эйлера по численной модели.

Умение оценивать модельную предсказуемость в представлении Лагранжа имеет очевидные практические приложения. В настоящее время автономные дрейфующие буи различной конструкции стали основным техническим средством для исследования Мирового океана. Поэтому проблема сравнения измерений, проводимых с автономных дрейфующих буев, с модельными результатами является одной из актуальных проблем океанографии.

В первом параграфе настоящей главе статистика ошибки прогноза, определенной как среднеквадратичная ошибка между модельным прогнозом и реальными наблюдениями в представлении Лагранжа, была исследована с помощью анализа первых одиннадцати моментов ошибки прогноза.

С этой целью траектории реальных буев, запущенных в Мексиканский залив в 1998 г. для изучения динамики больших антициклонических вихрей, сравнивались с траекториями частиц, предсказанными в модельном поле циркуляции, воспроизводимом РОМ с пространственным разрешением равным $1/12^\circ$. Результаты расчетов циркуляции в

Мексиканском заливе были любезно предоставлены профессором L. Kantha (University of Colorado, Boulder). Сравнения проводились на горизонте 50 м.

Наши расчеты демонстрируют, что статистика ошибки прогноза является существенно не гауссовской, и ее моменты подчиняются степенному закону. Степенной рост ошибки интерпретируется как супердиффузионный режим, который характерен для циркуляции, в структуре функции тока, в которой доминируют особые точки седлового типа. Заметим, однако, что ошибка прогноза не обладает свойством фрактальности и не может быть описана в линейном приближении даже тогда, когда ее величина мала.

В диссертационной работе найдено, что плотность вероятности ошибки прогноза для нулевой начальной ошибки удовлетворяет уравнению диффузионного типа с коэффициентом диффузии типа Ричардсона-Обухова. Это уравнение корректно описывает эволюцию функции плотности вероятности ошибки прогноза для малых (до 2 дней) и промежуточных (до 10 дней) временных масштабов. Его аналитическое решение приводится в первом параграфе настоящей главы. Плотность вероятности времени модельной предсказуемости имела длинный "хвост", вытянутый в область больших времен предсказания.

Предсказуемость POM для Мексиканского залива в представлении Лагранжа была оценена с помощью Ляпуновской размерности и оказалась равной примерно 14–20 дням. Предсказуемость этой же модели в представлении Лагранжа была значительно короче, только около 4–6 дней. Продолжительность экстремальных прогнозов составляла до 20 дней.

Во второй главе диссертации обсуждаются физические механизмы, которые ограничивают предсказуемость лагранжевых дрейфтеров в океане, и объясняется, как эти механизмы детектируются с помощью традиционных характеристик, обычно рассчитываемых по траекториям реальных дрейфующих буев: корреляционным тензорам и дисперсиям буев. Для этих целей были проанализированы траектории поплавков нейтральной плавучести (RAFOS), запускаемые в течение 14 лет в Калифорнийское Противотечение профессором С. Collins (Калифорния, США).

В сравнении с традиционным подходом, используемым в океанографии для статистического анализа дрейфтерных данных, в настоящей диссертационной работе применялась оригинальная процедура для исключения среднего дрейфа из RAFOS траекторий и специальные

критерии, позволяющие оценить качество такого исключения. Это позволило существенно улучшить количественные оценки рассеяния RAFOS буев, которые были рассчитаны ранее в работе (Collins et al., 1996), и найти новые закономерности в поведении этих буев.

Два результата представляются важными с теоретической и практической точек зрения. Прежде всего, из анализа корреляционного тензора и тензора дисперсии, рассчитанных по RAFOS траекториям, был детектирован суб-диффузионный режим (аномальная диффузия) в поведении поплавков нейтральной плавучести и найдены физические причины, объясняющие его существование.

Эта диффузия была обусловлена захватом RAFOS поплавков бароклинными волнами Россби после того, как поплавок выходил из противотечения и начинали дрейфовать на запад. Период волн Россби, равный примерно 100—120 суток, был оценен из поведения спектрального тензора, рассчитанного по корреляционному тензору непосредственно по траекториям поплавков.

Было установлено, что отчетливо выраженные "хвосты" корреляционных тензоров являются следствием того, что поплавок преимущественно вращался в антициклоническом направлении, совершая одновременно поступательное движение на запад. Вследствие этого, антисимметричная компонента тензора диффузии была не равна нулю, что ускорило движение поплавков в западном направлении.

Выводы. В настоящей главе диссертационной работы были исследованы некоторые специфические особенности, возникающие при использовании Лагранжевых буев для оценки модельной предсказуемости.

Мы показали, что в отличие от случаев, когда модельная предсказуемость оценивается в представлении Эйлера, динамика ошибки не может быть описана в линейном приближении, несмотря на то, что ошибка прогноза мала. Это первое и существенное отличие между представлениями Лагранжа и Эйлера при использовании их для оценки модельной предсказуемости.

В наших численных экспериментах ошибка нелинейно эволюционировала, плотность распределения позиционной ошибки была сильно не Гауссовская. Мы нашли элегантное уравнение, описывающее динамику плотности вероятности ошибки прогноза в представлении Лагранжа.

Во-вторых, наши эксперименты, в общем, подтверждают тот факт, что время модельной предсказуемости в представлении Лагранжа

практически всегда меньше, чем время модельной предсказуемости в представлении Эйлера. Однако, наши расчеты демонстрируют существование экстремально успешных прогнозов поведения индивидуальных лагранжевых буев. Заметим, что продолжительность экстремально успешных прогнозов превышала продолжительность среднего прогноза примерно в 5—6 раз.

В-третьих, один из фундаментальных механизмов, ограничивающих предсказуемость поведения Лагранжевых буев в океане, обусловлен механизмом аномальной диффузии. Мы показали на основе анализа данных наблюдений за дрейфующими буями типа RAFOS, что аномальная диффузия действительно наблюдается в реальных морских условиях и может быть детектирована через анализ структуры "хвоста" корреляционного тензора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Здесь кратко обсуждаются основные результаты, полученные в настоящей диссертационной работе и выносящиеся на защиту.

В работе сформулирована оригинальная концепция для анализа предсказуемости океанографических моделей и на ее основе изучены фундаментальные аспекты проблемы модельной предсказуемости. Такой подход в сравнении с традиционными подходами, используемыми в метеорологии и океанографии, имеет ряд очевидных преимуществ с теоретической точки зрения и в практических приложениях.

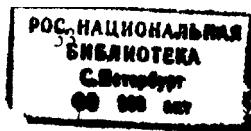
Прежде всего, он позволяет ввести уравнения для описания статистики времени модельной предсказуемости и рассмотреть с единой теоретической позиции различные проблемы модельной предсказуемости океанографии без априори неприемлемых упрощений и предположений относительно статистики ошибки прогноза. В частности, ошибка прогноза не предполагается малой.

Использование теории, развитой в диссертации, дает возможность получить аналитические оценки времени предсказуемости для ряда интересных практических задач. В настоящей работе в дополнение к модельным упрощенным примерам мы оценили время предсказуемости черноморской циркуляции на синоптических масштабах.

Основываясь на развитой теории, мы установили следующие новые закономерности в предсказании некоторых типов аттракторов (динамических режимов циркуляции), которые должны наблюдаться в реальных условиях в Мирового океане. Во-первых, наша теория предсказывает, что ошибка прогноза крупномасштабной, синоптической и мезомасштабной циркуляции не является гауссовской и должна быть описана с помощью цепочки моментов времени предсказуемости. Использование только первых двух моментов, что традиционно делается в океанографии и метеорологии, упрощает математическое описание проблемы предсказания, но вводит физически неоправданные ограничения на статистические свойства ошибки прогноза. В результате этого прогноз загроубляется и теряется очень ценная информация относительно статистики ошибки прогноза. Во-вторых, теория предсказывает, что вероятностные распределения времени предсказуемости в общем случае имеют несимметричную форму, характеризующуюся наличием "хвостов", которые формируются относительно редкими прогнозами аномально большой или малой продолжительности по сравнению со средней предсказуемостью. Нами были найдены аномально длительные (экстремально успешные) прогнозы для странных аттракторов и квазиаттракторов. Фактически статистика экстремально успешных прогнозов определяет горизонт модельной предсказуемости.

Развитая в диссертации теория позволяет предсказывать экстремально успешные прогнозы, основываясь на оценках, полученных в прогностических ансамблях малой размерности. Этот результат теоретически обосновывает возможность детектирования экстремально успешных прогнозов на практике и их использования для повышения практического качества прогноза в технике ансамблевого моделирования.

Новый метод (МОСД) был развит для практической реконструкции океанических полей по малым выборкам наблюдений, искажаемых сильным шумом с неизвестными статистическими свойствами. Этот метод показал себя очень эффективным при анализе данных наблюдений в прибрежных районах Мирового океана, т.е. в тех районах, где, как правило, качество измерений низкое, а наблюдаемые поля не могут быть аппроксимированы как статистически однородные. Приведенные в диссертации примеры по реконструкции полей радиоактивности в Карском и Белом морях, поверхностной циркуляции в Монтерейской бухте по измерениям высокочастотного радара берего-



вого базирования и синоптической циркуляции на Луизиано-Техасском шельфе подтвердили высокую устойчивость метода к вариациям длины выборки наблюдений и/или уровня шумов в наблюдениях. Это, в общем, позволило реконструировать тонкие детали циркуляции и скалярных полей различного происхождения и детектировать такое не тривиальное природное явление как синоптический реверс циркуляции на Луизиано-Техасском шельфе.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в монографии:

Трассеры в Океане: Параметризация переноса, численное моделирование динамики / В.Н. Еремеев, Л.М. Иванов. — К.: Наукова Думка, 1987, — 142с;

и следующих статьях в рецензируемых журналах и трудах конференций:

1. Еремеев В.Н., Иванов Л.М., Смелянский В.И., Неелов В.А. Некоторые особенности рассеяния примеси в неустойчивом потоке. // Изв. АН СССР. Физика Атмосферы и Океана.—1985,2, 36 ^ 2.

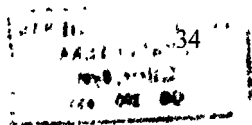
2. Еремеев В.Н., Иванов Л.М., Смелянский В.И. Некоторые закономерности дрейфа софаровских поплавков в синоптическом вихревом поле. //ДАН СССР — 1986 , т. 288, 2, —с. 470-474.

3. Трешников А.Ф., Турецкий В.В., Данилов А.И., Еремеев В.Н., Иванов Л.М., Смелянский В.М. Об оптимальном размещении в Южной Атлантике дрейфующих буев, отслеживаемых со спутника.// ДАН СССР. —1986, т. 287,2, — с.430-434.

4. Иванов Л.М., Смелянский В.И. О структуре тензора коэффициентов мезомасштабной диффузии // Морской Гидрофизический Журнал — 1988. 4, —с. 38-44.

5. Еремеев В.Н., Иванов Л.М., Кухарчик А.В. Использование квазилагранжевой информации для мониторинга термогидродинамических полей океана // ДАН СССР — 1989, т. 307, 2, —с. 450—454.

6. Гертман И.Ф., Еремеев В.Н., Иванов Л.М., Кочергин С.В., Мельниченко О.В. Некоторые типы черноморских поверхностных течений //ДАН СССР — 1991, т. 320,1, —с. 199—203.



7. Еремеев В.Н., Иванов Л.М., Мельниченко О.В. О нахождении модового состава трехмерного термогидродинамического поля // ДАН СССР — 1991, т. 319, 6, —с. 1453—1456.
8. Eremeev V. N., Ivanov L.M., Kirwan A.D. The reconstruction of characteristics of oceanic flows from quasi-Lagrangian data, Part I: Approach and mathematical methods // J. Geophys. Res., 1992, 97, C6, 9, p.733—9,742. Part 2. Characteristics of Large Scale Circulation in the Black Sea //J. Geophys. Res., 1992, 97, C6, —p. 9,743—9,753.
9. Ivanov L. M., Kirwan A.D., Melnichenko O.V. Prediction of the stochastic behavior of nonlinear systems by deterministic models as a classical time-passage probabilistic problem // Non. Proc. Geophys., 1994, 1, — p.224—233.
10. Eremeev V. N., Ivanov L.M., Kirwan A.D. ,Margolina T.M. Analysis of Cesium Pollution in the Black Sea by Regularization Methods // Mar. Poll. Bull., 1995, 30, 7, —p. 460—462.
11. Eremeev V.N., Ivanov L.M., Kirwan A.D., Margolina T.M. Amount of Cs¹³⁷ and Cs¹³⁴ Radionuclides in the Black Sea produced by the Chernobyl Accident // J. Environ. Radioactivity, 1995, — p.49—63.
12. Данилов А.М., Иванов Л.М., Кулаков М.Ю., Марголина Т.М., Павлов В.К. Современный радиоактивный климат Карского моря // ДАН России, 1996, 346, 4, — с. 545—548.
13. Ivanov L.M., Margolina T.M. Reconstruction of oceanographic fields without the information on statistical properties of noise // Proceeding of the First Conference on Coastal Oceanic and Atmospheric Prediction, 1996, Atlanta, —p. 155—158.
14. Ivanov L.M., Margolina T.M., Melnichenko O.V. Prediction and Management of Extreme Events Based on a Simple Probabilistic Model of the First-Passage Boundary // Phys. and Chem. of the Earth (and Solar System), 1999, 1, 2, — p. 73—79.
15. Ivanov L.M., Margolina T.M. Prediction in geophysical hydrodynamics as the probabilistic problem of the first-passage boundary // Proc. Rossby-100 Symposium, Sweden, 1999, —p. 63—69.
16. Ivanov L.M., Kirwan, A.D., Margolina T.M. Filtering noise from oceanographic data with some applications for the Kara and Black Seas // J. Mar.Sys., 2001, 28, 1—2, —p. 113—139.

17. Ivanov L.M., Petrenko L.A. Prediction of the modern haline stratification in the Black Sea through a simple balance model // *Sov. J. Phys. Oceanogr.*, 2001, 2, — p. 11—24.
18. Chu P.C., Ivanov L.M., Fan C Backward Fokker-Plank equation for determining model valid prediction period // *J. Geophys. Res.*, 2002, 107, C4, — p. 2586—2596.
19. Chu P.C., Ivanov L.M. Linear and nonlinear perspectives of forecast error estimate using the first passage time // In *Proa: Symposium on Observations, Data Assimilation, and Probabilistic Prediction*. American Meteorological Society, 2002, Orlando, Florida, —p. 127—132.
20. Chu P.C., Ivanov L.M., Melnichenko O.V., Margolina T.M. On probabilistic stability of an atmospheric model to differently scaled perturbations // *J. Atmos. Sci.*, 2002, 59, 19, —p. 2860—2873.
21. Chu P.C., Ivanov L.M., Kantha L., O.V. Melnichenko O.V., Poberezhny Ya.A. Power decay law in model forecast skill // *Geophys. Res. Lett.*, 2002, 29, 15, —p. 38—1 —38—4.
22. Chu P.C., Ivanov L.M., Korzhova T.P., Margolina T.M., Melnichenko O.V. Analysis of sparse and noisy data using flow decomposition. Part I: Theory // *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 2003, 20, —p. 478—491. Part II: Applications to Eulerian and Lagrangian data // *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 2003, 20, —p. 492—512.
23. Collins C.A., Ivanov L.M., Melnichenko O.V. Seasonal variability of the California Undercurrent: statistical analysis based on the trajectories of floats with neutral buoyancy // *Phys. Oceanography*, 2003, 13, 3, — p. 135—147.
24. Данилов А.И., Иванов Л.М., Марголина Т.М., Клепиков А.В. Изменчивость поверхностной циркуляции в Южном океане, реконструированная по данным ПГЭП буев // *ДАН СССР*, 2003, т.391, 3, — с. 1—5.
25. Collins C.A., Ivanov L.M., O.V. Melnichenko O.V., Garfield N. California undercurrent variability and eddy transport estimated from RAFOS float observations // *J. Geophys. Res.*, 2004, 38, —p. 23—1 — 23—7.
26. Иванов Л.М., Мельниченко О.В. Реконструкция прибрежной циркуляции по наблюдениям высокочастотного радара. // *Морской Гидрофизический Журнал*, 2004, 3, —с. 57—63.

27. Chu P.C., Ivanov L.M., Margolina T.M. Rotation method for reconstructing process and field from imperfect data. *Int. J. Buf. and Chaos*, 2004, 34, — p. 24—29.

28. Ivanov L.M., Margolina T.M., Danilov A.I. Application of inverse technique to study radioactive pollution and mixing processes in the Arctic Seas // *J. Mar. Sys.*, 2004, 15, —p. 461—468.

29. Chu P.C., Ivanov L. M., Kantha K., Melnichenko O.V., Poberezhny Yu. A. Lagrangian predictability of high-resolution regional models: the special case of the Gulf of Mexico // *Nonlin. Proc. Geophys.*, 2004, v.11, 1, -p. 1-19.

ИВАНОВ Леонид Михайлович

**ВЕРОЯТНОСТНЫЕ АСПЕКТЫ ПРЕДСКАЗАНИЯ
И РЕКОНСТРУКЦИИ ОКЕАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Подписано в печать 29.09.04. Формат 60x90 1/16. Печать офсетная.

Печ. л. 2,375. Тираж 100 экз.

Заказ № 34.

Ротапринт ДАНИИ, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38

20490