

На правах рукописи

ГРИГОРЬЕВ АЛЕКСАНДР ВАЛЕНТИНОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСВОЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ВЕРОЯТНОСТНЫ-
МИ МЕТОДАМИ В БАРОТРОПНОЙ МОДЕЛИ СИНОПТИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ В
ОКЕАНЕ

(специальность 04.00.22 - геофизика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Севастополь 1992 г.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00816246 (R)

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ГРИГОРЬЕВ АЛЕКСАНДР ВАЛЕНТИНОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСВОЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ВЕРОЯТНОСТНЫ-
МИ МЕТОДАМИ В БАРОТРОПНОЙ МОДЕЛИ СИНОПТИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ В
ОКЕАНЕ

(специальность 04.00.22 - геофизика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Севастополь 1992 г.

АВ 25.806

Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте Академии наук Украины

научный руководитель - доктор физико-математических наук, профессор И. Е. Тимченко

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук В. А. Рожков
доктор физико-математических наук В. В. Кныш

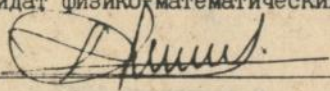
Ведущая организация - Институт океанологии РАН

Защита диссертации состоялась "26" января 1992 г. в 9:00 час. на заседании специализированного совета Д 016.01.01 при Морском гидрофизическом институте АН Украины. Адрес совета: 335000, Севастополь, ул. Капитанская, 2 МГИ АН Украины

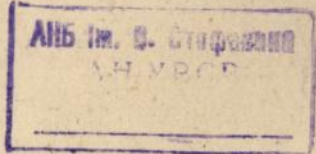
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Морского гидрофизического института АН Украины.

Автореферат разослан "15" октября 1992 года.

Ученый секретарь специализированного совета, кандидат физико-математических наук



А. М. Суворов



Актуальность темы. Внимание к проблеме усвоения информации в моделях динамики океана вызвано возрастающей доступностью натуральных данных и повышенной чувствительностью современных численных моделей к точности задания начальных условий и качеству усвоения. Основной акцент в исследованиях по данной проблеме делается на выбор наилучших алгоритмов усвоения в зависимости от типа решаемых задач.

В сравнении с метеорологической информацией данные наблюдений в океане в большинстве своем отличаются значительно асинхронностью и слабым пространственным разрешением полей, их объем даже в крупномасштабных экспериментах минимален. Поэтому использование массивов натуральных данных как эталона для оценки адекватности модели и качества усвоения до настоящего времени вызывает сомнение. В таких условиях основным инструментом оптимизации алгоритмов усвоения является имитационное моделирование, когда "истинная" эволюция гидрофизических полей имитируется посредством численной модели. При использовании отлаженных алгоритмов появляются основания утверждать, что полученные при помощи моделей с усвоением данных поля лучше отражают реальную изменчивость в океане, нежели полученные из анализа наблюдений или при моделировании отдельно.

Учитывая специфику проведения измерений в океане (в частности, их асинхронности и нерегулярности), представляется целесообразным проводить усвоение данных на основе метода оптимальной фильтрации, позволяющего учитывать изменения корреляционной структуры ошибок моделирования. В силу сложности реализации таких (так называемых динамико-стохастических, ДСМ) моделей и доступной в прошлом мощности компьютеров численные эксперименты по верификации алгоритмов были вынужденно выполнены на весьма грубых пространственных сетках, не позволяющих с достаточной точностью отслеживать изменения формы корреляционной функции - основной характе-

ристики, определяющей качество усвоения. Поэтому, несмотря на в целом положительные результаты применения методов оптимальной фильтрации в моделях океана, их сравнительная эффективность (по отношению к более простому методу оптимальной интерполяции) остается недостаточно изученной.

В диссертации приведены результаты оценок эффективности усвоения вероятностными методами в модели синоптических движений. Для этого используются модификации модели, основанной на уравнении для баротропного вихря, наиболее часто применяемом в теоретических и методических исследованиях. Выбор такого класса моделей обусловлен и сравнительной простотой при сохранении способности отражения наиболее характерных физических особенностей океана. Основные результаты исследования получены методом имитационного моделирования, который позволяет по усмотрению исследователя определять характер неопределенности и данных измерений. Для проверки результатов, полученных в численных экспериментах, выполнены расчеты с усвоением реальных данных ПОЛИМОДЕ. Применяемые для усвоения алгоритмы представляют собой модификации оптимальной фильтрации (с использованием параметризации корреляционной функции ошибок) и оптимальной интерполяции.

Цель и задачи работы. Основная цель работы заключается в изучении реакции модели на вводимую информацию, оценке применимости используемых методов усвоения при моделировании эволюции поля скорости и их сравнительной эффективности, а также в создании оптимального в рамках доступных вероятностных методов алгоритма усвоения. Для достижения этой цели в работе решаются следующие задачи:

создание алгоритмов усвоения в модели синоптических движений, основанных на использовании методов оптимальной фильтрации;

исследование реакции линейной и нелинейной модели на усвоение информации в зависимости от пространственно-временной плотности наблюдений, уровня неопределенности моделирования и выбранного алгоритма усвоения;

- оценка сравнительной эффективности использования различных алгоритмов усвоения;
- оптимизация алгоритма динамико-стохастической модели;
- анализ полученных результатов с целью установления зависимости качества моделирования от эволюции статистической (корреляционной) структуры полей;
- оценка практической значимости полученных результатов путем проведения экспериментов с усвоением натуральных данных;
- выработка рекомендаций по оптимальному размещению сети наблюдений в случае их использования в ДСМ и выбору оптимального алгоритма модели в зависимости от характера имеющихся натуральных данных.

Научная новизна и основные результаты работы. В диссертации предложен метод создания нелинейной ДСМ. В основе метода лежит возможность использования системы прогностических стохастико-динамических уравнений, замкнутой на уровне вторых моментов. Создана численная ДСМ, основанная на уравнении для баротропного вихря, замкнутая на уровне вторых моментов и предназначенная для слежения за эволюцией поля скорости на синоптических масштабах движений. Для обеспечения возможности слежения за эволюцией корреляционной функции ошибок моделирования усвоение данных проводится в поле относительной завихренности.

Проведены численные эксперименты с целью определения реакции модели на усвоение информации в зависимости от дискретности усвоения, уровня неопределенности начальных полей, степени нелинейности модели и используемых алгоритмов усвоения. Выполнено сопоставление результатов применения различных алгоритмов и предложен оптимальный для данной ДСМ. Аналогичные эксперименты проведены с усвоением данных натуральных наблюдений ПОЛИМОДЕ.

Определена зависимость качества усвоения от характера эволюции корреляционной структуры моделируемых полей, получено эволюционное уравнение для корреляционной функции оши-

бок прогноза относительной завихренности. Даны рекомендации по оптимизации сети наблюдений и алгоритмов усвоения в моделях рассматриваемого типа.

Практическая ценность работы. Предложенная в диссертации модель может быть использована для слежения за эволюцией поля скорости на гидрофизических полигонах, таких как Полигон-70, ПОЛИМОДЕ и Мегалигон. Результаты анализа применения различных вариантов алгоритмов усвоения могут быть использованы при выборе метода усвоения данных и планировании натурных наблюдений. С целью дальнейшего развития исследований в этом направлении получено эволюционное уравнение для корреляционной функции ошибки прогноза относительной завихренности. Результаты работы могут быть использованы в океанологических и метеорологических учреждениях Госкомгидромета и Академии наук при разработке и реализации методов четырехмерного анализа геофизических полей. Научные результаты работы были использованы в отчетах по проекту "Разработать методологию системного изучения физических процессов в океане, способствующую повышению эффективности гидрофизических исследований" (шифр 3.3.5.1).

Достоверность работы обеспечивается тщательным тестированием использованных в расчетах программ, хорошим качественным согласием результатов расчетов с соответствующими теоретическими представлениями. Эксперименты с усвоением информации проводились в контролируемых условиях, с использованием методов математического моделирования геофизической гидродинамики и вычислительной математики, а также с привлечением данных натурных наблюдений. При повторении расчетов, сделанных другими авторами, получено хорошее качественное совпадение с результатами последних.

Апробация работы. Полученные в диссертации результаты обсуждались на семинарах отдела динамико-стохастического моделирования океана и отдела гидрофизики шельфа МГИ АН Украины, конференциях преподавателей и сотрудников Одесского гидрометеорологического института (Одесса, 1985, 1986 г. г.), се-

минарах лаборатории морских научно-методических исследований ОдО ГОИН (Одесса, 1985, 1986 г.г.), на научно-технической конференции "Вклад молодых ученых и специалистов в решение современных задач океанологии" (Севастополь, 1986 г.), I Всесоюзной школе-семинаре "Актуальные проблемы океанологии" (Репино, 1987 г.), конкурсах МГИ АН УССР им. В. В. Шулейкина (Севастополь, 1988, 1989, 1990 г.г., II премия), XXVIII конференции молодых ученых Гидрометцентра СССР (Москва, 1990 г.), IV Всесоюзной конференции по перспективным методам планирования и анализа экспериментов при исследовании случайных полей и процессов (Петрозаводск, 1991 г.). В полном объеме работа была представлена на Гидрофизическом семинаре МГИ АН Украины.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 175 страниц, включая 65 рисунков. Библиография состоит из 92 наименований, в том числе 34 работ зарубежных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, показаны ее новизна и практическая значимость, формулируются цель и задачи исследований и кратко излагается содержание диссертации.

В главе I изложены основные положения теории оптимальной фильтрации с позиции ее применимости для усвоения данных в моделях динамики океана, предложена динамико-стохастическая модель, на основе которой будут проведены исследования, и продемонстрированы результаты ее тестирования посредством проведения численных экспериментов.

В первом параграфе рассмотрены как линейные, так и нелинейные алгоритмы фильтрации. С учетом специфики использования методов оптимальной фильтрации в моделях океана (невоз-

возможность слежения непосредственно за эволюцией корреляционной функции ошибок вследствие ее многомерности, и поэтому необходимость введения параметризации корреляционной функции, основанной на знании поля дисперсий ошибок), предложен нелинейный алгоритм усвоения информации. В его основе лежит прогностическая система уравнений для средних значений и дисперсий ошибок относительной завихренности, замкнутая на уровне вторых моментов условного распределения вероятностей. При этом значения дисперсий используются в явном виде при прогнозе средних значений, то в определенных случаях повышает точность прогноза. Предложенный способ создания ДСМ проиллюстрирован на примере модели, основанной на одномерном уравнении переноса (уравнении Бюргера без вязкости).

Во втором параграфе главы представлена численная ДСМ синоптической динамики океана. Прогностические уравнения модели в безразмерном виде, используемые для их численной аппроксимации, могут быть записаны в следующем виде:

$$\frac{d}{dt}\{q\} + eJ(\{\psi\}, \{q\}) + \frac{d}{dx}\{\psi\} = -e(\frac{d}{dx}\{q'u'\} + \frac{d}{dy}\{q'v'\}) , \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}\{q'^2\} + eJ(\{\psi\}, \{q'^2\}) + 2\{q'v'\} = -2e(\frac{d}{dx}\{q'u'\} \cdot \frac{d}{dx}\{q\} + \frac{d}{dy}\{q'v'\} \cdot \frac{d}{dy}\{q\}) , \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}\{q'u'\} = -\{q'^2\}[A\frac{d}{dx}\{q\} + B\nabla^2(\frac{d}{dx}\{q\})] , \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}\{q'v'\} = -\{q'^2\}[A\frac{d}{dy}\{q\} + B\nabla^2(\frac{d}{dy}\{q\})] , \quad (4)$$

$$\{q\} = \nabla^2\{\psi\} . \quad (5)$$

Здесь u, v - компоненты вектора скорости; $q = du/dy - dv/dx$ - относительная завихренность; ψ - геострофическая функция тока ($u = -d\psi/dy, v = d\psi/dx$); $J()$ - якобиан; A, B - коэффициенты, определяемые путем анализа статистической структуры начальных полей ошибок; $e = U/vL^2$ - параметр нелинейности (v - параметр

Горюлиса, L -) характерный линейный масштаб); $\{ \}$ - средние значения; (\prime) - отклонения от средних (ошибки); остальные обозначения - общепринятые. Способ получения уравнений (1)-(5) подробно описан в диссертации и цитируемой литературе (работы Томпсона, 1986, 1988 гг.).

Численная аппроксимация уравнений в целом соответствует предложенной Каменковичем, Ларичевым и Харьковым для баротропной модели синоптической динамики океана (работы 1981 г.). Для производной по времени d/dt использовалась схема "чехарда" (второго порядка точности). Пространственные производные d/dx и d/dy аппроксимировались центральными разностями (второй порядок точности). Для представления якобиана $J(\cdot)$ использовалась схема Аракавы (1966 г.). Уравнение Пуассона (5) для нахождения функции тока решалось методом Хокни (1965 г.). Данная схема обеспечивает сохранение интегральных инвариантов - энергии и энтропии, - для суммы осредненной и "пульсационной" компонент полей. В численных экспериментах по тестированию модели и усвоению данных методом имитационного моделирования для устранения возможных краевых эффектов используются граничные условия периодичности. В экспериментах с усвоением натуральных данных ПОЛИМОДЕ для граничных сеточных точек моделируемой области используется численная схема указанных выше авторов с незначительными изменениями.

Поскольку базовым эволюционным уравнением модели является уравнение для относительной завихренности, имитация измерений и усвоение информации также производится в поле завихренности. Алгоритм усвоения наблюдений в момент времени t в некоторых точках моделируемой области $r_i(x_i, y_i)$, $i=1, N$ (N - количество точек измерений) имеет вид:

$$\{q\}^{\wedge}(r) = \{q\}(r) + \sum_{i=1}^N g(r, r_i) [q_{изм}(r_i) - \{q\}(r_i)] , \quad (6)$$

$$\{q'\}^{\wedge}(r) = \{q'^2\}(r) - \sum_{i=1}^N g(r, r_i) P(r, r_i) , \quad (7)$$

$$\{q'u'\}^{\wedge}(r) = \{q'u'\}(r) - Dqu, \quad (8)$$

$$\{q'v'\}^{\wedge}(r) = \{q'v'\}(r) - Dqv, \quad (9)$$

$$P(r, r_i) = \prod_{j=1}^N g(r, r_j) P(r_i, r_j), \quad i=1, N. \quad (10)$$

Алгоритм (6)-(10) общепринят для ДСМ океана и основан на предположении об ортогональности ошибки оценивания по отношению к измерениям и отсутствию корреляции между ошибкой оценивания и самой оптимальной оценкой. Поправка $Dqu(v)$ для смешанной дисперсии производится для согласования полей прогнозируемых характеристик, основанное на их однозначной взаимосвязи. Способ ее получения приводится в диссертации.

Качество усвоения определяется по существу точностью расчета весовых коэффициентов g при решении системы уравнений Колмогорова (10), или точностью оценки корреляционной функции поля ошибок F . В диссертации используются два варианта ее параметризации. Традиционным в ДСМ океана является ее представление в виде:

$$P(r, r_1) = \{q'^2\}^{1/2}(r) \{q'^2\}^{1/2}(r_1) Q(|r-r_1|), \quad (11)$$

$$Q(|r-r_1|) = \{q'(r)q'(r_1)\} / \{q'^2\}(r). \quad (12)$$

Q - нормированная корреляционная функция поля ошибок в начальный момент времени, считается сохраняющей свою форму в течение всего срока расчетов. Такой алгоритм будем называть фильтрацией. Положительным результатом его использования может быть учет вызванной усвоением неоднородности полей. Параметризация вида

$$P(r, r_1) = \{q'^2\}(r) Q(|r-r_1|), \quad (13)$$

соответствующая предположению о сохранении начальной однородности и изотропии поля ошибок и пренебрежению изменениями

формы корреляционной функции при усвоении информации, сводит систему уравнений для нахождения весовых коэффициентов к алгоритму оптимальной интерполяции. В диссертации применяются оба алгоритма, в первую очередь для сравнительной оценки эффективности их использования

Расчетная сеточная область при тестировании модели и в имитационных экспериментах представляла собой квадрат со стороной, равной $2\pi L = 750$ км. При характерном значении $v = 2E-11$ (м·с⁻¹) единице безразмерного времени соответствует значение $T = (vL)^{-1} = 4,8$ суток. Использовалась равномерная расчетная сетка (129x129) узлов (шаг по пространству $dx = 5.86$ км) в имитационных экспериментах и сетка (33x33) узла ($dx = 23.44$ км) при тестировании ДСМ.

Надежность ДСМ эталонной модели обуславливалась неопределенностью задания начальных полей. Начальные поля для ДСМ создавались посредством спектрального разделения некоторого исходного "истинного" поля (характерное значение скорости $U = 5$ см/с, параметр нелинейности $e = U/vL^2 = 1$) на осредненную и "пульсационную" составляющие с некоторым граничным волновым числом. В качестве меры неопределенности использовалось отношение начальной дисперсии поля ошибок к дисперсии среднего поля $rel = \langle q'^2 \rangle / \langle q^2 \rangle$ (знак $\langle \rangle$ означает осреднение по сеточной области). По полученным таким образом начальным полям ошибок могут быть найдены все необходимые для моделирования величины.

В третьем параграфе приведены результаты тестирования модели. Осуществлялась ее проверка на вычислительную работоспособность и физическую адекватность. В качестве характерных особенностей модели можно выделить нелинейное взаимодействие между средними полями и полями ошибок и отсутствие заметного влияния подсеточных эффектов без введения искусственной вязкости.

В главе II представлены результаты численных экспериментов по количественной оценке эффективности усвоения в линейном ($e = 0.1$) и нелинейном ($e = 1$) вариантах модели. На основа-

нии полученных результатов проведена оптимизация алгоритма модели. Сделаны выводы, касающиеся зависимости качества моделирования от значений варьируемых параметров.

Эксперименты выполнялись методом численного имитационного моделирования. Максимальный срок прогноза - 9 ед. безразмерного времени (43.2 сут.). Имитация эволюции "истинного" поля осуществлялась на основе уравнения баланса баротропного вихря. Одновременные измерения имитировались в равноудаленных друг от друга точках расчетной сеточной области. Количественной мерой точности прогноза и усвоения была осредненная по расчетной сеточной области нормированная квадратичная ошибка прогноза завихренности. Использовались следующие параметры модели: уровень неопределенности rel - 0.16, 0.25, 0.34, 1.47; временная дискретность усвоения Δt - 0.9, 1.8, 2.7, 3.6 единиц безразмерного времени (4.3, 8.6, 13.0 и 17.3 суток); число точек усвоения N - 64, 36, 16. Поскольку эксперименты были проведены для регулярной сети наблюдений, качество усвоения прямо зависит от радиуса корреляции поля ошибок, а число точек усвоения по сути определяет его пространственную дискретность.

Первый параграф главы II посвящен экспериментам с линейной ДСМ. Расчеты показали, что имеет место линейная зависимость величины падения ошибки от количества внесенной информации. Тенденция роста ошибок после усвоения параллельна своему аналогу при его отсутствии. Преимущество использования фильтрации перед интерполяцией отмечается лишь при пространственной дискретности усвоения, меньшей радиуса корреляции "истинного" поля. В количественном отношении различия результатов с применением обоих методов минимальны.

Во втором параграфе изложены результаты экспериментов с нелинейной ДСМ. Использование вторых моментов при прогнозе средних плей в данном случае приводит к увеличению точности прогноза на срок до 40 суток, но повышает чувствительность модели к качеству усвоения. Главными особенностями результатов в сравнении с линейным вариантом являются возрастание

крутизны роста ошибки со временем (следствие недостаточной точности восстановления "истинного" поля и нелинейности), а также возможность ухудшения оценок в результате усвоения при $\sigma_t=0.9$ (следствие вызванной предыдущими усвоениями неоднородности корреляционной функции, сглаживаемой в процессе счета и нелинейным "размыванием" при увеличении дискретности σ_t). Характерное время "восстановления" возмущенной при усвоении корреляционной функции совпадает с характерным синоптическим масштабом времени (4.8 суток).

В экспериментах с различным числом точек усвоения наблюдается уменьшение со временем преимущества усвоения относительно большого количества информации вследствие внесения и больших искажений в моделируемые поля, что ведет к ухудшению прогноза вследствие нелинейности. Этот эффект усиливается при увеличении степени неопределенности моделирования, а также при уменьшении дискретности усвоения. Влияние вносимых искажений в форму корреляционной функции становится значимым при пространственной дискретности усвоения, меньшей радиуса корреляции "истинного" поля.

С увеличением уровня неопределенности вызванная усвоением неоднородность поля ошибок и связанные с ней эффекты усиливаются. Поэтому возрастание крутизны роста ошибок и падение относительного преимущества усвоения большого количества информации будет находиться в прямой зависимости от величины уровня неопределенности σ_{el} . В то же время с возрастанием уровня неопределенности, а значит и абсолютных значений дисперсий ошибок, будет уменьшаться точность их прогнозирования.

Использование фильтрации дает преимущество перед интерполяцией в течение всего времени модельных расчетов лишь при малых значениях параметров $\sigma_{el}=0.16$, $\sigma_t=0.9$ и максимальном $N=64$. В этом случае влияние ошибок прогноза дисперсий незначительно, и параметризация вида (11), (12) приводит к удовлетворительным результатам в смысле учета неоднородности. Но с увеличением значений σ_{el} или уменьшением N это преимущест-

во исчезает, предпочтительным оказывается использование интерполяции. При больших ошибках ($rel=1.47$) явное преимущество имеет использование оптимальной интерполяции. Ухудшение результатов усвоения при фильтрации будет неизбежным следствием ошибок прогноза дисперсий.

Сопоставляя результаты расчетов при различной пространственно-временной дискретности усвоения с характерными масштабами изменчивости и радиуса корреляции "истинного" поля, можно сделать вывод, что влияние измерений на форму корреляционной функции поля ошибок становится заметным при дискретности усвоения $\delta t < T_{char}$ по времени и $\delta l < R_{char}$ по пространству. T_{char} - характерное время изменчивости "истинного" поля, R_{char} - радиус корреляции "истинного" поля. Другими словами, граничные значения пространственно-временной дискретности усвоения имеют порядок характерного времени изменчивости и радиуса корреляции истинных полей.

В третьем параграфе главы проводится оптимизация алгоритма усвоения в нелинейной ДСМ. Наилучшим алгоритмом фильтрации для нелинейной модели будет такой его вариант, при котором окажется невозможным качественное ухудшение прогноза в результате усвоения, а количественные оценки ошибок моделирования будут минимальными. На основании результатов проведенных экспериментов сделан вывод, что при условии проведения наблюдений с дискретностью, меньшей граничных значений по времени или по пространству, наилучшим методом усвоения будет фильтрация с использованием линейного прогноза дисперсий (ЛПД-фильтрация). Преимущества использования нелинейной фильтрации в этом случае могут проявляться лишь при уровнях относительной ошибки по дисперсии, меньших 20%. В иных случаях наиболее целесообразным будет применение алгоритма оптимальной интерполяции.

В главе III исследуется зависимость отмеченных закономерностей от статистической структуры поля ошибок, ее эволюции со временем и при усвоении информации. Полученные в диссертации результаты сопоставляются с результатами исследований

других авторов. Представлены результаты экспериментов с усвоением данных ПОЛИМОДЕ. Предложен формализм получения эволюционного уравнения для корреляционной функции ошибок относительной завихренности.

В первом параграфе результаты имитационных экспериментов интерпретируются как следствие эволюции статистической структуры (корреляционных функций) моделируемых полей. Существование асимптотического режима статистической стационарности полей обусловлено влиянием внешнего возбуждения и нелинейности модели. Время возврата формы корреляционной функции после усвоения к стационарному виду обратно пропорционально уровню шума (нелинейности). Поскольку в имитационных экспериментах зашумление полей в явном виде не проводилось, полученные значения граничной пространственной и временной дискретности усвоения следует рассматривать в качестве максимальных. В целом сделанные выводы соответствуют результатам других авторов и принятым предположениям о статистических особенностях гидрофизических полей.

Второй параграф главы посвящен экспериментам с усвоением в ДСМ натуральных данных. В качестве исходной информации об эволюции вихревого поля используются поля синоптической компоненты функции тока, полученные по данным прямых измерений океанских течений, выполненных в 1977-78 гг в рамках эксперимента ПОЛИМОДЕ. Моделирование синоптических движений в районе ПОЛИМОДЕ в те же сроки на основе бароклиной и баротропной квазигеострофических моделей было в свое время выполнено Каменковичем, Ларичевым и Харьковым. В целом проведенные исследования свидетельствуют о возможности баротропных прогнозов для отдельных горизонтов на сроки порядка месяца.

Прогностические уравнения ДСМ и алгоритмы усвоения, используемые в III главе диссертации, соответствуют своим аналогам, описанным предыдущих главах. Характеристики расчетной области и параметры модели: $e=U/vL^2-1$ ($U=5$ см/с, $L=50$ км, $v=2E-11$ (м·с⁻¹)); шаг по времени - 3 часа, шаг по пространству (сетка (33x33)) - 9 км, срок расчетов - с 20

апреля по 20 мая 1978 г. Неопределенность задания начальных полей составляла 0.1 от величины дисперсии среднего поля. Одновременные измерения имитировались в равноудаленных друг от друга точках сеточной области. Дискретность усвоения δt : 1, 4, 8 и 12 суток; число точек усвоения N : 4, 6, 10, 16, 30, 121.

Расчеты без усвоения показали, что использование информации о начальной дисперсии ошибки при прогнозе средних полей приводит к незначительному увеличению точности прогноза в пределах 23 суток, но при усвоении более стабильным является вариант модели без учета вторых моментов. Возрастание крутизны роста ошибки со временем после усвоения по отношению к ее тенденции в отсутствие усвоения имеет место и в данном случае. Эффект ухудшения оценок в результате усвоения наблюдается лишь при ежесуточном усвоении и только при δt (пространственная дискретность), меньшей 30 км. Лучшие в количественном отношении результаты получены при усвоении данных каждые 4 суток. Эффективность усвоения при пространственной дискретности, большей 75 километров, весьма мала. Оптимальная пространственная дискретность находится в пределах от 45 км до 75 км. В качественном смысле особенность, связанная с отсутствием однозначной прямой зависимости величины ошибки от числа точек усвоения, имеет место и при усвоении реальных данных. Результаты применения всех трех алгоритмов (интерполяции, нелинейной фильтрации и ЛПД-фильтрации) при временной дискретности δt в 4, 8 и 12 суток очень близки, с преимуществом использования интерполяции. В случае минимальной пространственно-временной дискретности ($\delta t=1$ и $N=121$) явное преимущество имеет ЛПД-фильтрация.

Таким образом, в качественном смысле результаты имитационных экспериментов и расчетов с усвоением натуральных данных идентичны. Расхождения наблюдаются в количественных оценках характерных значений граничной пространственно-временной дискретности. Для эксперимента ПОЛИМОДЕ они определены как равные одним суткам по времени и 30 километров по прост-

ранству и должны рассматриваться как частные для данных условий.

В третьем параграфе представлен вывод точного уравнения для корреляционной функции полей ошибок завихренности. Данное уравнение необходимо для повышения эффективности усвоения информации в моделях синоптических движений, связанного главным образом с повышением точности оценивания и прогноза корреляционных функций поля ошибок. Поскольку слежение за эволюцией корреляционной функции необходимо в том случае, когда дискретность усвоения достаточно мала, достаточным будет прогноз на основе линейного уравнения. Основной сложностью при его выводе является нахождение корреляционных связей завихренности и скорости. Для их отыскания были использованы результаты Бергера (1985), где такая связь выражена через пространственный интеграл от автокорреляционной функции ошибок завихренности и функции Грина для уравнения Пуассона (5).

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

1. Предложена численная нелинейная динамико-стохастическая модель для анализа данных наблюдений синоптических движений в океане, основанная на использовании уравнения баланса баротропного вихря.

2. Алгоритм ДСМ включает в себя систему уравнений, позволяющую прогнозировать средние значения и дисперсию поля завихренности с учетом их взаимного влияния, и процедуру коррекции, основанную на параметризации корреляционной функции ошибок через известные значения дисперсий.

3. Учет дисперсий ошибок при прогнозе средних полей приводит к увеличению точности прогноза на срок до 40 суток в имитационных экспериментах и 23 суток при моделировании реальных полей, но повышает чувствительность ДСМ к качеству усвоения информации.

4. При усвоении данных в линейной ДСМ имеет место линейная зависимость величины падения ошибки от количества

внесенной информации, сохранение тенденции роста ошибок после усвоения и преимущество использования фильтрации в сравнении с интерполяцией.

5. Особенности результатов усвоения в нелинейной ДСМ являются возрастание крутизны роста ошибок после усвоения, отсутствие прямой зависимости величины ошибки от числа точек усвоения и возможность ухудшения оценок в результате усвоения с малой дискретностью.

6. Влияние измерений на форму корреляционной функции поля ошибок становится заметным при пространственно-временной дискретности усвоения, меньшей характерного времени изменчивости и радиуса корреляции "истинных" полей. Эти значения следует рассматривать в качестве максимальных.

7. Граничные значения дискретности усвоения реальных данных эксперимента ПОЛИМОДЕ определены как одни сутки по времени и 30 километров по пространству. Оптимальные значения временной дискретности усвоения находятся в пределах более одних и менее восьми суток, а пространственной - от 45 до 75 километров.

8. При частоте наблюдений, не превышающей граничные значения дискретности, целесообразно использование для усвоения алгоритма интерполяции. В ином случае необходимо применение метода ЛФД-фильтрации, основанного на использовании нелинейного уравнения для прогноза средних значений завихренности и линейного прогноза дисперсий.

9. Выявленные закономерности являются следствием эволюции статистической структуры моделируемых полей, в частности, существования асимптотического режима стационарности корреляционных функций, вызванного нелинейностью процессов и наличием внешнего возбуждения.

10. Качественное сходство результатов, полученных методом имитационного моделирования и при усвоении натуральных данных, свидетельствует об эффективности имитационных экспериментов как метода исследований.

11. Для достижения эффективности и выбора оптимального ал-

горитма усвоения данных в моделях синоптических движений необходимо слежение непосредственно за эволюцией корреляционной функции ошибок на основе линейного уравнения.

Научные результаты, включенные в диссертацию, опубликованы в следующих работах:

1. Информационные аспекты моделирования океана // Деп. ВИНТИ СССР, 1985, N 6441-85.

2. Модели динамики океана с условным осреднением уравнений // В кн.: Актуальные проблемы океанологии: Тез. докл. I Всесоюз. школы-семинара. Л., Гидрометеоиздат, 1987, с. 52-53.

3. Условное осреднение уравнений в моделях динамики океана // В кн.: Тез. докл. III съезда советских океанологов. Ленинград, 1987.

4. Модели динамики океана с условным осреднением уравнений // Мор. гидрофиз. журн., 1988, N 5, с. 7-14 (совместно с И. Е. Тимченко).

5. Численная динамико-стохастическая модель синоптической изменчивости океана, замкнутая на уровне вторых моментов // В кн: Вклад молодых ученых и специалистов в решение современных проблем океанологии: Тез. докл. III науч.-тех. конф. Крыма. Севастополь, 1988.

6. Численные эксперименты с усвоением информации в модели движений синоптического масштаба, основанной на уравнении баланса баротропного вихря // В кн: Тонкая структура и синоптическая изменчивость морей и океанов: Тез. докл. III Всесоюз. симпозиума. Таллинн, 1990.

7. Простейшая численная ДСМ синоптической изменчивости океана, замкнутая на уровне вторых моментов // Мор. гидрофиз. журн., 1990, N 2, с. 23-28.

8. Численные эксперименты с усвоением информации в простейшей ДСМ синоптической изменчивости океана, замкнутой на уровне вторых моментов // Мор. гидрофиз. журн., 1992, N 3, с. 47-54.

Публикации достаточно полно отражают основные результаты диссертации.



Григорьев Александр Валентинович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСВОЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ВЕРОЯТНОСТНЫМИ МЕТОДАМИ В БАРОТРОПНОЙ МОДЕЛИ СИНОПТИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИИ В ОКЕАНЕ

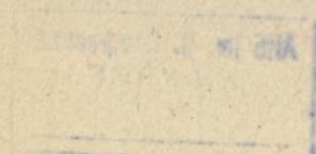
Автореферат

Подписано в печать . . . 92 г.

Формат бумаги 60x90 1/16. Объем 1 уч. - изд. л. N БЯ 03072

Заказ Тираж 100 экз.

Отпечатано на ротапринтере Морского гидрофизического института
АН Украины
385000, г. Севастополь, ул. Капитанская 2.



AB 25.806

AB 25.806