

На правах рукописи

НЕЧВОЛОВ
Леонид Всеволодович

УДК 551.465

МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ПРОГНОЗ
ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ
ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

11.00.08 — океанология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 1987

Государственный комитет СССР по гидрометеорологии
и контролю природной среды

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

НЕЧВОЛОВ
Леонид Всеволодович

УДК 551.465

МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ПРОГНОЗ
ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ
ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

11.00.08 — океанология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Москва — 1987

Работа выполнена в Государственном океанографическом институте.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
КАЛАЦКИЙ В. И.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
ЗАЛЕСНЫЙ В. Б. (Отдел вычислительной математики Академии
Наук СССР)

кандидат физико-математических наук ГУЛЕВ С. К. (ГОИН)

Ведущая организация: Гидрометеорологический центр СССР.

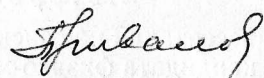
Защита состоится « 10 » июня 1987 г. в 16 час. 45 мин.

на заседании специализированного совета К 024.02.01 в Государственном океанографическом институте (119838, ГСП, Москва, Г-34, Кропоткинский пер., 6).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного океанографического института.

Автореферат разослан « 30 » апреля 1987 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат географических наук



ПРИВАЛОВА И. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема моделирования, расчета и прогноза термической структуры верхних слоев океана приобрела за последние годы особую актуальность. Это связано с необходимостью решения насущных народнохозяйственных задач, таких, как долгосрочное прогнозирование погоды, обеспечение эффективного рыбного промысла, предотвращение загрязнения вод Мирового океана (Марчук, 1982). Кроме того, весьма злободневно стоят сейчас оборонные вопросы, связанные с подводным мореплаванием.

Последние 10—15 лет уделяется большое внимание разработке методов расчета и прогноза вертикальной структуры деятельного слоя океана (Калацкий, 1978; Краус, 1979; Филлипс, 1980). Вместе с тем, приходится констатировать, что на сегодняшний день не существует достаточно надежных моделей и методов, способных воспроизводить сезонную и синоптическую изменчивость гидрофизических полей деятельного слоя Северной Атлантики с необходимой для практики точностью. Более того, не существует сколь-нибудь обоснованных ответов на следующие принципиальные вопросы. В какой мере одна, даже наиболее современная модель деятельного слоя, пригодна для корректного количественного описания изменчивости характеристик деятельного слоя на всей акватории Северной Атлантики в целом? Какое количество моделей необходимо для решения такой задачи? Модели какого типа целесообразно при этом использовать?

Исходя из вышесказанного были сформулированы цели работы.

Цели диссертационной работы заключались в исследовании возможностей моделирования деятельного слоя Северной Атлантики в рамках интегрального подхода; в оптимизации методов расчета и прогноза термических характеристик деятельного слоя; в разработке практических рекомендаций по использованию этих методов. В ходе выполнения работы, в соответствии с поставленными целями, решались следующие **задачи**: всесторонний анализ современных подходов к моделированию, расчету и прогнозу термических характеристик деятельного слоя океана и обобщение существующего опыта использования различных моделей и методов применительно к Северной Атлантике; создание и верификация ма-

тематической модели деятельного слоя Северной Атлантики, достаточно экономичной при проведении массовых расчетов на ЭВМ и способной с необходимой точностью воспроизводить характерные особенности формирования и изменчивости термической структуры деятельного слоя на большей части акватории Северной Атлантики; апробация и тестовые испытания методов расчета и прогноза термических характеристик деятельного слоя Северной Атлантики на основе разработанной модели; оценки эффективности расчетов и прогнозов и соответствующее районирование Северной Атлантики.

Фактический материал. Для решения поставленных задач наряду с опубликованными материалами (атласы, справочники), использовались архивные данные ГОИНа, ВНИИГМИ МЦД, ГМЦ СССР, оперативная информация, поступающая в ГМЦ СССР и наблюдения на судах погоды ГОИНа, полученные при непосредственном участии автора (НИСП «Георгий Ушаков» 1984, 1985; НИСП «Виктор Бугаев» 1986 г.).

Научная новизна. Разработана и верифицирована по большому массиву данных наблюдений обобщенная интегральная модель деятельного слоя Северной Атлантики. В модели предложены новые параметризации для скорости вовлечения и турбулентного теплообмена на нижней границе слоя перемешивания, основанные на выводах теории размерностей и подобия и анализе натурных данных.

Впервые на основе модельных расчетов получены количественные оценки сезонной и межгодовой изменчивости полей толщины и температуры верхнего квазигомогенного слоя Северной Атлантики, вертикального градиента температуры в слое скачка и коэффициента турбулентного теплообмена в термоклине.

По результатам тестовых испытаний модели определена степень адвективного влияния на эволюцию термической структуры деятельного слоя для разных районов Северной Атлантики. Разработан и апробирован простой косвенный метод расчета адвекции в деятельном слое, и получены реалистичные оценки меридионального переноса тепла в Северной Атлантике.

Разработана и испытана на судах погоды методика краткосрочного прогноза термических характеристик деятельного слоя Северной Атлантики, позволяющая, в отличие от существующих методов, рассчитывать не только температуру и толщину однородного слоя, но и градиент температуры в слое скачка.

На основе физико-географического анализа и численных экспериментов с моделью разработаны практические рекомендации по моделированию, расчету и прогнозу вертикальной термической структуры деятельного слоя Северной Атлантики.

Практическая ценность. Результаты работы в настоящее время используются в отделе морских прогнозов ГМЦ СССР, в Госцентре «Океан» при ВНИРО, на судах погоды ГОИНа для обеспечения оперативными прогнозами рыбопромыслового флота.

Результаты, полученные в работе, могут найти применение в практике оперативного и долгосрочного прогнозирования в подразделениях Госкомгидромета СССР, Минрыбхоза СССР, Министерства обороны СССР. Разработанная модель может быть включена в качестве «подсеточной» в модели циркуляции океана, которые активно развивались в последние годы в научно-исследовательских учреждениях Академии Наук СССР (ИО АН СССР, ОВМ АН СССР).

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на XVIII Генеральной Ассамблее Международного Геофизического Союза (Гамбург, ФРГ, 1983 г.), на III Всесоюзной Конференции по проблемам промышленного прогнозирования (Мурманск, 1986 г.), на Всесоюзном семинаре «Актуальные проблемы океанологии» (Репино, 1987 г.), на сессиях Ученых Советов ГОИНа и ГМЦ СССР (1983, 1986 гг.), на конференциях молодых ученых ГОИНа (1984, 1985 гг.), Института океанологии АН СССР (1984, 1985 гг.), ЛГМИ (1985 г.), на семинарах отдела динамики моря ГОИНа (1983—1987 гг.).

По теме диссертации опубликовано 10 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего 191 наименование, в том числе 62 зарубежных авторов. Диссертация содержит 126 страниц машинописного текста, 48 рис., 11 табл.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе, которая носит обзорный характер, рассматриваются основные направления теоретического моделирования верхних слоев океана. Проводится критический анализ современных тематических моделей деятельного слоя, дается их классификация.

Анализируется правомерность различных гипотез замыкания в рамках дифференциального и интегрального подходов к моделированию деятельного слоя (ДС) океана. Обсуждаются результаты апробации разных моделей и методов по расчету и прогнозу термической структуры ДС Северной Атлантики.

Показано, что эффективность существующих методов диагноза и прогноза не может удовлетворить сегодняшние запросы практики. Вместе с тем, делается вывод о том, что для решения задачи расчета и прогноза термических характеристик ДС в масштабах океана оптимальным является интегральный подход к моделированию, как самый простой и надежный инструмент исследования, в полной мере отвечающий современным техническим возможностям обеспечения подобных задач исходной информацией и ресурсами ЭВМ. Наиболее продуктивным в этом направлении следует приз-

нать цикл работ Калацкого и Нестерова (1976—1985 гг.), на основе которого в Гидрометцентре СССР создана и используется в оперативной практике методика прогноза температуры и толщины верхнего квазигоризонтального слоя (ВКС) Северной Атлантики для летнего периода года.

Дальнейшему развитию и обобщению этого подхода посвящены следующие главы диссертации.

Во второй главе выводятся уравнения обобщенной двухслойной модели; и осуществляется ее верификация на основе тестовых массивов данных наблюдений.

При построении двухслойной модели используются такие традиционные гипотезы интегрального подхода, как гипотеза локальности взаимодействия, в основе которой лежит предположение о преобладающей роли вертикальной диффузии тепла по отношению к адвективным процессам; гипотеза о линейной связи плотности и температуры воды, что позволяет исключить из рассмотрения влияние солёности и считать в данной постановке температуру аналогом плотности; и, наконец, ключевая гипотеза о наличии однородного приповерхностного слоя, что дает возможность интегрировать исходные уравнения в пределах ВКС и тем самым упростить систему. Кроме того, применяются специальные гипотезы, касающиеся турбулентного режима ВКС, где наряду с традиционными параметризациями К-теории турбулентности используются соотношения Колмогорова (1942) и выводы теории подобия.

На поверхности океана, в качестве граничных условий, задаются потоки тепла (Q_0) и импульса (τ_{xy}), на нижней границе однородного слоя ($z=h$) задается поток тепла в виде:

$$Q_h = \langle \omega' T' \rangle \Big|_h = K_T \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_h$$

где $\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_h$ — градиент температуры в слое скачка, K_T — эффективный коэффициент турбулентного теплообмена.

Уравнения модели имеют следующий вид.

1. Проинтегрированное в пределах ВКС уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = (Q_0 - Q_h) / h \quad (1)$$

2. Модифицированное кинематическое условие на нижней границе ВКС:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial h}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_h + \omega \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_h, \text{ где } \omega \approx K_T / h.$$

Комбинируя это уравнение с (1), после несложных преобразований имеем эволюционное уравнение для толщины ВКС:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = (2Q_h - Q_0) / h \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_h \quad (2)$$

3. Соотношение для расчета градиента температуры в слое скачка, которое выводится с использованием известных параметризаций слагаемых в уравнении баланса кинетической энергии турбулентности (Калацкий, 1978; Alexander, Kim, 1976):

$$\frac{\partial T}{\partial h} \Big|_h = \beta \exp\left(-\sqrt{\sin \varphi} \frac{h}{h_d}\right) - \lambda_1 (Q_0 + \varepsilon h) / K_T + \gamma \quad (3)$$

4. Линейная интерполяционная зависимость для расчета коэффициента турбулентного теплообмена в слое вовлечения, где привлекаются гипотезы о масштабе и энергии турбулентности при ветровом и конвективном перемешивании (Монин, Яглом 1965):

$$K_T = c \lambda_2 (h_d - h) U_* + \lambda_3 (g z_T h | Q_0|)^{1/3} + K_\phi \quad (4)$$

Показано, что асимптотические режимы характеристик турбулентного ВКС, рассчитанные для чисто ветрового перемешивания и для случая свободной конвекции, хорошо согласуются с выводами теоретических и экспериментальных исследований (Китайгородский 1977, Баренблатт 1982, Deardorf 1983).

В системе (1)–(4) приняты следующие обозначения: T — температура ВКС, t — время, φ — географическая широта, $g z_T$ — параметр плавучести, $h_d \sim U_* / f$ — глубина экмановского слоя трения, $U_* = (\tau / \rho)^{1/2}$ — динамическая скорость, β , ε , c , λ , γ , K_ϕ — постоянные коэффициенты модели.

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \begin{cases} 1, & \text{при } (Q_0 + \varepsilon h) < 0 \\ 0, & \text{при } (Q_0 + \varepsilon h) \geq 0 \end{cases} \\ \lambda_2 &= \begin{cases} 1, & \text{при } (h_d - h) > 0 \\ 0, & \text{при } (h_d - h) \leq 0 \end{cases} \\ \lambda_3 &= \begin{cases} 1, & \text{при } Q_0 < 0 \\ 0, & \text{при } Q_0 \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{Единичные ассиметричные} \\ \text{функции Хевисайда} \end{array}$$

Таким образом, построена параметрическая модель, включающая два нелинейных дифференциальных уравнения первого порядка, которая позволяет по заданному начальному распределению температуры в ДС (T и h ВКС) и известным потокам тепла через поверхность (Q_0) и скорости ветра (V) рассчитывать временную эволюцию термических характеристик ВКС.

С целью верификации модели и оптимизации значений свободных параметров используется тестовый массив данных наблюдений.

ний (1963—1973 гг.) корабля погоды «Пара», где влияние адвекции несущественно (Tabata, 1965). Проведена серия модельных экспериментов по расчету короткопериодной (по среднесуточным данным) и сезонной (по среднемесячным данным) изменчивости термических характеристик ДС. Система решалась численно, методом Эйлера. Установлено, что параметры модели устойчивы во времени, причем их значения близки по величине при расчетах короткопериодной и сезонной эволюции ВКС. Это подтверждает правомерность основных физических гипотез, используемых при выводе уравнений модели.

Показано, что модель вполне адекватно воспроизводит характерные особенности короткопериодной и сезонной изменчивости характеристик ДС, ошибки расчета температуры не превышают $0,5^{\circ}\text{C}$ и толщины ВКС — 10 м, что находится в пределах погрешностей инструментального измерения этих величин. По результатам тестовых испытаний делается вывод о том, что разработанная модель пригодна для корректного количественного описания особенностей формирования и изменчивости термической структуры ДС при чисто локальном взаимодействии океана и атмосферы.

В третьей главе анализируются результаты испытаний модели по расчету сезонной эволюции термической структуры ДС Северной Атлантики.

Генеральная линия проведенных исследований заключалась в следующем. Поскольку мы имеем модель локального взаимодействия, то ее использование для расчетов в динамически активных районах океана неизбежно должно приводить к возникновению значительных погрешностей вследствие неучета адвективного переноса тепла. Однако, можно систематизировать эти погрешности, оценив тем самым степень адвективного влияния на формирование структуры ДС в отдельных районах Северной Атлантики, и учесть это влияние при последующих расчетах.

На первом этапе рассчитывалась сезонная эволюция ВКС по климатическим среднемесячным данным восьми кораблей погоды «А», «В», «С», «Д», «Е», «I», «J», «K». Установлено, что погрешности расчета температуры δT минимальны для точек «А» и «С», которые находятся в сравнительно малоадвективных районах. Остальные станции погоды, (исключая «В», где существенно влияние солености), находятся в зоне действия макроциркуляционной системы Гольфстрима, Северо-Атлантического и Канарского течений, и, соответственно, погрешности расчета температуры здесь максимальны (до $2,5^{\circ}\text{C}$ на «Д» и «Е», и до $1,5^{\circ}\text{C}$ для остальных точек). На адвективную «природу» полученных погрешностей указывает и тот факт, что в годовом ходе ошибок расчета температуры ВКС для названных кораблей погоды прослеживается отчетливая полугодовая периодичность, и это хорошо соотносится с современными представлениями о полугодовой цикличности расходов воды и тепла в зонах струйных течений (Баранов, 1971).

Полученные по климатическим данным ежемесячные величины δT были учтены в качестве адвективной поправки при расчетах за конкретные годы. Показано, что такой способ учета адвекции позволяет весьма существенно повысить точность результатов (в среднем на 20—30% по сравнению с локальным вариантом), даже в те годы когда наблюдаются значительные аномалии температуры ВКС. Это позволяет предположить, что крупные аномалии поверхностной температуры воды формируются не за счет межгодовых и сезонных вариаций адвективного переноса, который можно рассматривать в качестве квазипостоянного климатического фона, а возмущениями, накладывающимися на этот фон в ходе локального взаимодействия океана и атмосферы.

Результаты расчетов годового хода толщины ВКС и градиента в слое скачка хорошо согласуются с данными наблюдений (Кузнецов 1982, Kang, 1985). Значения рассчитанных коэффициентов турбулентного теплообмена в сезонном термоклизе по порядку величин близки к натурным оценкам (Li, oth. 1984).

Аналогичный способ учета адвекции использовался при расчетах пространственного распределения термических характеристик ДС по акватории Северной Атлантики ($20-60^{\circ}$ с. ш.) на сетке с 2,5 и 5° пространственным разрешением. Вначале по климатическим данным рассчитывались поля адвективных поправок (δT), с помощью которых затем корректировались результаты вычислений за конкретные годы (1957—1972 гг.). В качестве критерия достоверности результатов в соответствии с имеющимися наставлениями (1977 г.) принималась величина $0,67 \sigma_{T\text{факт}}$, и расчет считался эффективным, если $\delta T < 0,67 \sigma_{T\text{факт}}$ в соответствующем узле сетки. Осредненные по месяцам за 15 лет интегральные характеристики достоверности расчетов приведены в таблице 3.1.

мес.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ср.
N	36	51	67	78	80	70	62	49	72	75	69	68	64
Na	61	68	77	85	90	85	76	55	78	86	82	82	77
ΔN	25	17	10	7	10	15	14	6	6	11	13	14	13

В первой графе таблицы (N) приведено количество в % узлов расчетной области, где ошибка расчета температуры по локальной модели находится в пределах $0,67 \sigma_{T\text{факт}}$. Во второй графе (N_a) — та же характеристика с учетом адвективной поправки. В третьей графе (ΔN) показан процент улучшения по сравнению с локальным вариантом. Выделены два района низкой достоверности расчетов (~30% площади) в юго-восточной и северо-западной частях акватории, где наряду с адвективными факторами необходимо учитывать влияние солености. Основные выводы работы, перечисленные в заключении, следуют из анализа таблицы 3.1.

Рассчитанные среднemesячные поля толщины ВКС и градиента температуры в слое скачка хорошо согласуются с имеющимися режимными данными. Приводятся количественные оценки сезонной и межгодовой пространственно-временной изменчивости этих характеристик. Полученные поля величины коэффициента турбулентного теплообмена в сезонном термоклине характеризуются минимальными значениями в период прогрева (1—2 см²/с), и возрастанием коэффициента почти на порядок в умеренных и приполярных широтах в период осенне-зимней конвекции (15—20 см²/с).

Последний параграф третьей главы посвящен методам расчета адвекции и меридионального переноса в Северной Атлантике.

На основе анализа результатов предшествующих исследований делается вывод о том, что наиболее перспективными в настоящее время являются косвенные методы оценки адвекции и меридионального переноса из известных балансовых соотношений. Предложен простой метод расчета адвективного переноса тепла в ДС Северной Атлантики, базирующийся на полученных для каждого месяца величинах адвективной поправки (δT).

Адвекция в ВКС оценивается как

$$Q_a^{вкс} = \int_0^h \left(U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz = \delta T \cdot h / \delta t \quad (3.1)$$

где δt — шаг по времени равный одному месяцу.

В сезонном термоклине предполагается линейное убывание величины δT с глубиной до нижней границы ДС, за которую принят горизонт 300 м ($\delta T_{300} = 0$). Тогда, в слое h — 300 м адвекция определяется как

$$Q_a^{h-300} = \int_h^{300} \left(U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz = \frac{\delta T(300-h)}{2\delta t} \quad (3.2)$$

Окончательно, для всего деятельного слоя имеем:

$$Q_a^{ДС} = \delta T(h+300)/2\delta t \quad (3.3)$$

С использованием соотношения (3.3) проведены расчеты адвективного переноса по сезонам, и определены его среднегодовые величины, хорошо согласующиеся с другими исследованиями (Смирнова, 1967; Степанов и др., 1984).

Полученные величины адвективного переноса в ДС используются для оценки среднегодового меридионального переноса (МПТ) в Северной Атлантике. При этом задается величина МПТ на

70° с. ш. (Aagaard, Greisman, 1975) и путем последовательного интегрирования с севера на юг в пределах широтных зон рассчитывается величина МПТ на каждой широте.

$$МПТ|_y = МПТ|_c - \int_{sc} Q_a d\tau dS \quad (3.4)$$

где S — площадь широтной зоны, τ — время (год).

Показано, что результаты этих расчетов хорошо сопоставимы с независимыми оценками других авторов в тех же пределах точности (Hastenrath 1980, Lamb 1980, Hall, Bryden 1982, Hsuing 1985). Делается вывод о перспективности использования предложенного метода, поскольку он исключает из рассмотрения трудноопределимые величины теплосодержания ДС, сохраняя, вместе с тем, все преимущества косвенных методов оценки адвекции и меридионального переноса.

Четвертая глава посвящена испытаниям модели (2.1) — (2.4) по расчету и прогнозу короткопериодной (3—5 суток) изменчивости термических характеристик ДС Северной Атлантики.

По результатам предыдущих тестовых испытаний (точка «Рара», гл. II) и апробации модели в оперативных условиях НИСП (точка «С», «Георгий Ушаков») делается вывод о том, что модель достаточно адекватно воспроизводит характерные особенности короткопериодной перестройки термической структуры ДС при прохождении сильных штормов, наиболее важные в прогностическом отношении.

Предложен метод прогноза термических характеристик ДС Северной Атлантики, основные положения которого сводятся к следующему. В качестве начальной и исходной информации используются факсимильные карты температуры воды и прогностические (на 3—5 суток) поля приземного атмосферного давления, передаваемые в оперативном режиме зарубежными радиометцентрами (Галифакс, Гамбург, Нортвуд, Мадрид). Начальные поля толщины ВКС задаются на основе режимных данных или рассчитываются по известным эмпирическим зависимостям (Rossby, Montgomery 1935, Китайгородский, 1970, 1977).

По прогностическим полям барика рассчитывается прогноз скорости ветра с использованием геострофических соотношений:

$$V_x = \gamma(\partial P / \partial y) \quad (4.2)$$

$$V_y = -\gamma(\partial P / \partial x) \quad (4.3)$$

$$\gamma = \delta / 2\omega \rho_a \sin \varphi \quad (4.4)$$

где V_x , V_y — составляющие скорости ветра, P — атмосферное давление, ω — угловая скорость, ρ_a — плотность воздуха, φ — широта, δ — коэффициент перехода от скорости геострофического ветра к скорости ветра в приводном слое атмосферы ($\delta = 0,6$).

Прогноз потока тепла через поверхность рассчитывается по эмпирической формуле, предложенной Нестеровым (1983):

$$Q = 0,50 N (1 + C^n) \quad (4.5)$$

$$\text{где } C = \begin{cases} V/V_N \text{ при } Q_N < 0 \\ V_N/V \text{ при } Q_N \geq 0 \end{cases}$$

Q — поток тепла, V — скорость ветра, индекс N обозначает среднемесячные величины, n — эмпирический параметр.

Учитывается также дрейфовый адвективный перенос, определяемый на основе известных экмановских решений для компонент дрейфового потока:

$$Q_a = \frac{C_d}{2\omega \sin \varphi} \left(\tau_y \frac{\partial T}{\partial x} - \tau_x \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4.6)$$

где $\tau_{xy} = C_d \rho_a |V| V_{xy}$, C_d — коэффициент трения ($C_d = 1.5 \cdot 10^{-3}$).

Далее анализируются результаты опытных прогнозов, выполненных с июля по сентябрь 1986 г. (НИСП «Виктор Бугаев»). Район прогноза ограничивается $30-60^\circ$ с. ш., $0-60^\circ$ з. д., пространственное разрешение метода 2.5° . Приводятся оценки эффективности прогнозов температуры ВКС. Здесь, наряду с традиционными критериями достоверности (оправдываемость по 0.67 $\sigma_{\text{факт}}$), рассчитывалась оправдываемость прогнозов по тенденции (процент узлов расчетной сетки, где совпадают знаки фактических и прогнозируемых изменений T ВКС), и оправдываемость методических (модельных) прогнозов по отношению к инерционному прогнозу (процент узлов расчетной области, где ошибка методического прогноза меньше, чем ошибка инерционного). Средние характеристики оправдываемости за весь период прогнозов сведены в таблицу 4.1.

Оправдываемость по $\sigma_{\text{факт}}$	82%
Оправдываемость по тенденции	65%
Оправдываемость относительно инерционного	51%

Показано, что предлагаемый метод прогноза термических характеристик ВКС по акватории Северной Атлантики наиболее эффективен в ситуациях, когда активизируется циклоническая деятельность, преобладают сильные штормовые ветры, приводящие к интенсификации конвективно-ветрового перемешивания в ДС, что обуславливает резкую короткопериодную перестройку температурного поля на большей части акватории. Выделены районы низкой

эффективности прогнозов (около 40% общей площади), которые расположены в северо-западной, юго-восточной частях рассматриваемой акватории и в зонах струйных течений.

Анализируются причины возникновения погрешностей, выдвигается гипотеза о повышенном фоне мелкомасштабной турбулентности в районах основных течений. Обсуждаются требования к точности начальной и исходной информации. Предложены практические рекомендации по дальнейшему развитию и совершенствованию прогностических моделей и методов.

В заключении формулируются основные выводы работы.

1. На основе диффузионной параметризации процессов ветрового и конвективного перемешивания в деятельном слое океана для пространственных ($2.5-5^\circ$) и временных (более 1 суток) масштабов осреднения построена двухслойная модель, которая позволяет адекватно воспроизводить эволюцию термических характеристик деятельного слоя (температуры и толщины ВКС, градиента температуры в сезонном термоклине) в синоптическом и сезонном диапазонах изменчивости при локальном теплонакоплении.
2. Численные эксперименты с разработанной моделью показали, что на большей части рассматриваемой акватории Северной Атлантики ($\sim 50-60\%$ общей площади) как сезонная, так и короткопериодная изменчивость термических характеристик деятельного слоя может с достаточной для практики точностью воспроизводиться в рамках одномерных локальных моделей без учета адвекции и влияния солёности (ошибки расчетов в пределах 67% природной изменчивости).
3. Выделены две области в северо-западной и юго-восточной частях акватории ($\sim 30\%$ общей площади), где локальные интегральные модели неприменимы в силу специфических региональных особенностей формирования вертикальной структуры деятельного слоя. Для этих районов целесообразно использовать специализированные (предпочтительно дифференциальные) модели.
4. Оценки влияния адвекции, полученные как разность фактических и рассчитанных локальных изменений температуры ВКС за период 1957—1972 гг., показали, что интегральный адвективный вклад в формирование поля температуры деятельного слоя Северной Атлантики наиболее существенно сказывается в начале лета (июнь—июль) и в середине зимы (январь—февраль), причем предложенный статистический метод учета адвекции в одномерных моделях дает возможность расширить область достоверных результатов расчетов до 70—75% общей площади Северной Атлантики.
5. Сопоставление межгодовой изменчивости (1953—1972 гг.) среднемесячных значений фактической температуры ВКС по данным кораблей погоды Северной Атлантики с рассчитанными вариациями температуры ВКС за счет локального теплонакопления дает основание предположить, что крупные аномалии температуры воды на поверхности формируются не из-за межгодовых и сезонных изменений адвективного переноса, который можно рассматривать в

качестве квазипостоянного климатического фона, а возмущениями, накладывающимися на этот фон в ходе локального взаимодействия океана и атмосферы.

6. Наибольшие погрешности при расчетах сезонного хода температуры ВКС по акватории Северной Атлантики наблюдаются в августе (оправдываемость расчетов 40—50%, при средней — 70—80%).

7. Для переходных сезонов (август) в расчетах необходимо использовать исходные данные с масштабом осреднения не более 3—5 суток, так как основной вклад в изменения структуры деятельного слоя в этот период вносят кратковременные и немногочисленные штормовые воздействия, поэтому сглаженные (среднемесечные) исходные ряды не позволяют в должной мере описать реальную изменчивость.

8. При проведении краткосрочных расчетов и прогнозов установлено, что короткопериодные (до 5 суток) изменения температуры ВКС при пространственном осреднении $2,5^\circ$, как правило, не превышают $0,5$ — $1,0^\circ\text{C}$. Это сопоставимо с точностью восстановления начального поля по фактическим данным, поэтому эффективность модельных прогнозов (оправдываемость до 90%) по сравнению с инерционными (оправдываемость $\sim 70\%$) проявляется в экстремальных штормовых условиях, когда изменения температуры по акватории наиболее значительны и достигают 3°C . Максимальные ошибки прогнозов концентрируются в зонах основных течений (до $1,5^\circ\text{C}$).

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Kalatsky V. I., Netchvolodov L. V. The method of the calculation of heat transport in the active layer of Northern Atlantic. — XVIII General Assambly UGGI and IUGG, IAPSO, Progr. and abstr., Hamburg, 1983, p. 254—255.
2. Нечволодов Л. В. Метод расчета переноса тепла в Северной Атлантике. — В сб. «Актуальные проблемы океанологии», М., ИОАН СССР, 1984, с. 35—39.
3. Нечволодов Л. В., Калацкий В. И. Параметризация конвективного перемешивания в двухслойной модели деятельного слоя океана. — Деп. ВНИИГМИ МЦД, 1985, 377 ГМ, 20 с.
4. Калацкий В. И., Нечволодов Л. В. Использование интегральных моделей верхнего слоя океана для расчета и прогноза его термических характеристик. — Тез. докл. III Всесоюз. конф. по проблемам промыслового прогнозирования, Мурманск, 1986, с. 26—27.
5. Нечволодов Л. В. К вопросу о вовлечении на нижней границе слоя перемешивания в океане. — В сб. «Проблемы современной океанологии», М., ИОАН СССР, 1987.
6. Нечволодов Л. В. К проблеме моделирования термической структуры деятельного слоя океана. — Тр. ГОИН, сб. «Теоретич. и эксперим. исслед. океанов и морей», вып. 178, 1986, (в печати).
7. Нечволодов Л. В. Моделирование сезонной эволюции деятельного слоя Северной Атлантики. — Тр. ГОИН, сб. «Вопросы динамики моря», вып. 188, 1987, (в печати).
8. Калацкий В. И., Нечволодов Л. В. Оценки интегрального переноса тепла течениями в деятельном слое Северной Атлантики. — Метеорология и гидрология, 1987, № 6, (в печати).
9. Нестеров Е. С., Нечволодов Л. В., Секретова Л. П. Моделирование термической структуры Норвежского моря. — Тр. ГОИН, в. 188, (в печати).
10. Нестеров Е. С., Нечволодов Л. В. Расчеты термической структуры верхнего слоя Норвежского моря. — Аннот. пер. пост. в ОФАП, 1987.

С. Нечволодов