

6-к
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

БОНДАРЕНКО НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ

УДК: 551.465

ДВУХСЛОЙНАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА И ПРОГНОЗА ВЕРТИКАЛЬНОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ ОКЕАНА

11.00.08 - океанология

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 1987

Работа выполнена в Одесском отделении Государственного океанографического института

Научный руководитель - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник В.И.Калацкий

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Пивоваров А.А. (МГУ)
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Рябинин З.Э (ГМЦ)

Ведущая организация: Ленинградский гидрометеорологический институт

Защита состоится "24" ноября 1987 г. в "16" час. "45" мин. на заседании специализированного совета К 024.02.01 в Государственном океанографическом институте, ГСП, Москва, Г-34, К

С диссертации
Государственного океанографического института

Автореферат

Ученый секрет
совета, кандидат наук

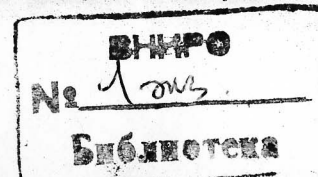
Пивалова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена созданию и совершенствованию математических моделей вертикального распределения температуры деятельного слоя океана. Актуальность исследуемого вопроса обусловлена необходимостью решения ряда конкретных народнохозяйственных задач, связанных с долгосрочным прогнозом погоды, охраной природной среды, нуждами рыбного промысла и других отраслей науки и производства.

Исследованию вертикальной структуры деятельного слоя океана в последнее время уделяется большое внимание (Тужилкин, 1978; Гемин, 1978; Зилитинкевич, Реснянский, Чаликов, 1978; Калацкий, 1978; Краус, 1979). Однако следует отметить, что в большинстве работ рассматривается только изменчивость температуры и толщины верхнего квазигомогенного слоя. Между тем существует довольно широкий ряд практических и теоретических задач, для решения которых необходимо знание характеристик всего деятельного слоя, включая и сезонный термоклин. К ним можно отнести величину и глубину залегания максимального вертикального градиента температуры, теплозапас деятельного слоя и другие.

Одним из способов, который позволяет определять эти параметры, является параметризация вертикального распределения температуры в сезонном термоклине. При этом удается построить энергетически замкнутые для всего деятельного слоя модели. В этом плане весьма конструктивной оказалась гипотеза об автономности распределения безразмерной температуры в пределах сезонного термоклина с использованием полиномиальной ее аппроксимации (Китайгородский, Миропольский, 1970).



Эта гипотеза неоднократно проверялась на натурных данных (Миропольский, Филюшкин, Чернышков, 1970, Нестеров, Калацкий, 1975; Ефимов, Даренко, 1980). Было показано (Решетова, Чаликов, 1977), что предположение об автомодельности приблизительно справедливо также и для солености. Использовалось и предположение об автомодельности потока тепла в сезонном термоклине (Филюшкин, Миропольский, 1981).

Автомодельность использовалась при создании многих моделей, где требовалась параметризация деятельного слоя (Каменкович, Харьков, 1975; Белевич, Чаликов, 1978; Реснянский, Тросников, 1980).

Однако последующие исследования показали, что об автомодельности можно говорить лишь приближенно, так как характеризующий ее наличие интегральный параметр не является величиной постоянной, а подвержен как пространственной, так и временной изменчивости, характеристики которой находятся в соответствии с пространственно-временными масштабами рассматриваемых процессов (Иванов, Тужилкин, 1979; Климов, 1981; Мошонкин, 1979). Таким образом, для описания эволюции термической структуры деятельного слоя на различных временных масштабах изменчивости, в частности, синоптическом, необходима более детальная параметризация вертикального распределения температуры в сезонном термоклине.

Целью работы является разработка двухслойной, энергетически замкнутой для всего деятельного слоя океана модели, которая позволяет рассчитать эволюцию вертикальной термической структуры с синоптическим и сезонным масштабами осреднения.

Для ее достижения решались следующие задачи:

1. Исследовать пространственно-временную изменчивость параметров термической структуры деятельного слоя океана, включая параметры сезонного термоклина, синоптического и сезонного масштабов.

2. Разработать метод параметризации вертикального распределения температуры в сезонном термоклине, который позволяет описывать это распределение на различных этапах развития и в различных условиях формирования сезонного термоклина.

3. Построить замкнутую систему уравнений для нахождения искомых параметров вертикальной структуры деятельного слоя.

4. Верифицировать и провести тестовые испытания разработанной модели на основе данных по Северной Атлантике.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в следующем:

- получены характеристики пространственно-временной изменчивости параметров вертикальной структуры деятельного слоя океана сезонного и синоптического масштабов, при этом показано отсутствие автомодельности распределения температуры в сезонном термоклине;

- разработан метод полиномиальной параметризации вертикального распределения температуры в сезонном термоклине, обобщающий предложенные ранее методики и позволяющий описывать профиль температуры на различных стадиях формирования сезонного термоклина;

- создана модель расчета и прогноза термической структуры деятельного слоя океана синоптического и сезонного масштабов, которая дает возможность определять такие практически необхо-

димые величины, как вертикальный градиент температуры в слое скачка, положение и величину максимального вертикального градиента температуры в сезонном термоклине и его теплозапас.

Практическая ценность. Результаты работы в настоящее время используются на судах погоды ГОИН для опытного обеспечения оперативными прогнозами рыбопромыслового флота. Они могут найти применение в исследовательской практике составления морских гидрологических прогнозов в Гидрометцентре СССР.

Разработанный метод параметризации вертикального распределения температуры в сезонном термоклине может быть использован как подсчетный в моделях взаимодействия океана и атмосферы с целью более корректного описания и учета структуры деятельного слоя.

Активный материал. Для решения поставленных задач использовали: данные атласов и справочников, а также материалы наблюдений НИСП ГОИН на океанской станции "С" с суточным и месячным осреднением за период 1976-1979 гг., на энергетических полигонах и микросъемках в Тропической (февраль-март 1981 г.) и Ньюфаундлендской (ноябрь 1981 - май 1983 гг.) энергоактивных зонах.

В организации и производстве наблюдений на судах погоды автор принимал непосредственное участие.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на семинарах лаборатории океанических исследований ОдО ГОИН (1986-1987 гг.), заседаниях Одесской секции Ученого совета ГОИН (1986, 1987 гг.), семинаре отдела динамики моря ГОИН (1987 г.), семинарах отдела морских гидрологических прогнозов ГМЦ СССР (1984,

1986 гг.), на двух Всесоюзных научных конференциях по исследованию роли энергоактивных зон океана в короткопериодных колебаниях климата (1984, 1986 гг.).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 123 страницы, включая 5 таблиц и 34 рисунка. Список литературы состоит из 96 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследуемой проблемы, формулируются цели и задачи диссертационной работы. Отмечается научная новизна и приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается пространственно-временная изменчивость вертикальной термической структуры деятельного слоя. Из спектра нестационарных процессов в океане выделены процессы синоптического и сезонного масштабов, представляющие основной интерес с прогностической точки зрения. Согласно работе Мони́на, Каменковича, и Корты (1974 г.) процессы синоптического масштаба имеют пространственные масштабы $10^1 - 10^2$ км, временные - $10^1 - 10^2$ дней, сезонного - 10^3 км и 1 год соответственно. При анализе данных, полученных на океанской станции "С", Ньюфаундлендском и Тропическом энергоактивных полигонах, рассматривалась пространственно-временная изменчивость следующих характеристик вертикальной термической структуры деятельного слоя океана: температуры T_s и толщины h верхнего квазидиородного слоя, величины максимального вертикального градиента

температуры $\Gamma_{\max}$ и глубины его залегания $Z_{\Gamma_{\max}}$, величины вертикального градиента температуры в слое, расположенном непосредственно под верхним квазиоднородным слоем Γ_{h+0} . Осуществлялся переход к безразмерной температуре θ и глубине z в сезонном термоклине согласно формулам:

$$\theta = (T_s - T_z) / (T_s - T_h), \quad z = (z - h) / (H - h),$$

где Z - глубина $h \leq z \leq H$, T_h - температура на нижней границе деятельного слоя H . Определялся параметр автомодельности, введенный Китайгородским и Миропольским (1970 г.):

$$\mathcal{L} = \int \theta(z) dz.$$

Анализ данных наблюдений показывает, что синоптическая изменчивость параметров деятельного слоя сравнима по величине с сезонной. При этом имеет место значительная пространственно-временная изменчивость не только характеристик верхнего квазиоднородного слоя, но и сезонного термоклина, в том числе и таких интегральных его характеристик, какой является параметр автомодельности. Так, на Троическом энергетическом полигоне амплитуда изменений значений параметра $\mathcal{L}$ составила 0,33 и 0,37 для двух сезонов соответственно, при среднем его значении, равном 0,50. Приведенные данные о сезонной изменчивости свидетельствуют о том, что $\mathcal{L}$ имеет годовой ход, то есть зависит от стадии развития сезонного термоклина. Для океанской станции "С" минимальное значение $\mathcal{L}$, равное 0,51 отмечается в феврале, максимальное - 0,77 в июле-августе. На Ньюфаундлендском энергетическом полигоне годовой ход величины параметра автомодельности составляет 0,51 - 0,79 в северной и 0,77 - 0,95 в южной частях полигона. Проявляется также влияние условий, в которых формируется термоклин, в первую очередь это направление верти-

кальных движений, скорость поступления тепла и скорость ветра. Таким образом, исследования изменчивости параметров термической структуры деятельного слоя показали, что для корректного её описания на синоптическом и сезонном масштабах необходимо отказаться от гипотезы автомодельности и применять более гибкие методы параметризации вертикального распределения температуры в сезонном термоклине.

Во второй главе излагаются физическая и математическая постановка задачи. Приводятся основные уравнения, использующиеся при построении локальной двухслойной модели деятельного слоя океана.

Предложенное Китайгородским и Миропольским (1970 г.) условие на верхней границе сезонного термоклина $\theta'''(0) = 0$, которое приводит к автомодельности распределения безразмерной температуры, предлагается заменить более обоснованным: $\theta'(0) = \Psi$. Здесь Ψ - функция, имеющая смысл безразмерного градиента температуры и равная $\Psi = \Gamma_{h+0} / \Gamma_c$, где Γ_c - средний по сезонному термоклину вертикальный градиент температуры. В этом случае безразмерная температура определяется полиномом вида:

$$\theta(z) = \Psi \cdot z + 3(2 - \Psi)z^2 + (3\Psi - 8)z^3 + (3 - \Psi)z^4.$$

При $\Psi = 8/3$ зависимость $\theta(z)$ переходит в формулу Китайгородского, Миропольского (1970 г.), при $\Psi = 3$ имеет место зависимость, предложенная Арсеньевым, Фельзенбаумом (1977 г.).

Функция, аналогичная по смыслу параметру автомодельности $\mathcal{L}$, и которую можно интерпретировать как функцию параметризации, будет определяться зависимостью:

$$\Psi = \int \theta(z) dz = (\Psi + 12)/20.$$

Введенная функция Ψ является, в отличие от Δ , меняющейся во времени и зависящей от условий теплообмена между верхним квазиоднородным слоем и сезонным термоклином.

Численные эксперименты показали, что для выполнения условия $0 \leq \Theta \leq 1$, означающего отсутствие инверсий на профиле температуры в сезонном термоклине, значения функции Ψ должны находиться в пределах от 0 до 4,8, что соответствует величинам функции параметризации 0,6 - 0,84. Это хорошо согласуется с данными, приведёнными в работе Нестерова, Калацкого, 1975г.

При выводе соотношения для потока тепла через нижнюю границу верхнего квазиоднородного слоя (q_h) полагается, что он является суммой двух слагаемых: потока тепла за счёт процесса вовлечения и диффузионного потока тепла. С использованием введенной функции Ψ для потока тепла через нижнюю границу верхнего квазиоднородного слоя получено выражение:

$$q_h = \Psi \frac{T_s - T_n}{H - h} \left(\frac{\lambda \Delta h}{2} \frac{\partial h}{\partial t} + \kappa \right),$$

где $\lambda = \lambda \left(\frac{dh}{dt} \right)$ - единичная функция Хевисайда.

В модели реализуются следующие основные уравнения:

- уравнение теплопроводности, проинтегрированное в пределах верхнего квазиоднородного слоя:

$$h \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_0 - q_h$$

где q_0 - кинематический поток тепла на поверхности океана;

- уравнение теплопроводности, проинтегрированное в пределах всего деятельного слоя:

$$[H - (H - h)\epsilon] \frac{\partial T_s}{\partial t} + (T_s - T_n) \epsilon \frac{\partial h}{\partial t} - (T_s - T_n)(H - h) \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = q_0$$

Привлечение уравнения баланса турбулентной энергии в интегральной форме:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{2}{h^2} [q_0 h - (G - D)],$$

а также формул для параметризации интегральной диссипации D и интегральной генерации турбулентной энергии G (Реснянский, 1975 г.) приводит к варианту (А) модели.

Вариант (В) основывается на использовании приближенного квазистационарного решения уравнения баланса энергии турбулентности в форме (Калацкий, 1978 г.):

$$\Psi = \frac{H - h}{T_s - T_n} [\tilde{\epsilon} \exp(-\frac{h}{d}) + \mu \Phi(h)],$$

где $\tilde{\epsilon}$, d , μ , $\Phi(h)$ - функции, определяемые по граничным условиям.

Таким образом, построена модель, по которой по заданному начальному распределению температуры в деятельном слое океана и известным значениям потока тепла через поверхность океана и скорости ветра рассчитывается временная эволюция характеристик термической структуры деятельного слоя.

Третья глава посвящена анализу полученной системы уравнений, а также результатов численных экспериментов.

Аналитически исследовались случаи сильного и слабого динамического воздействия при различных направлениях потока тепла. Показано, что в зависимости от скорости перемещения нижней границы верхнего квазиоднородного слоя могут иметь место различные эффекты в перестройке термической структуры сезонного термоклина. Результаты численных экспериментов также показали, что модель, с точки зрения физики процессов, правильно описывает изменчивость характеристик деятельного слоя в зависимости от внешних параметров.

Усиление ветра, при прочих равных условиях, приводит к увеличению толщины верхнего квазиоднородного слоя и понижению его температуры. При этом происходит увеличение значений функций Ψ , φ и вертикального градиента температуры в слое скачка. Эти процессы становятся более интенсивными в случае отрицательных значений потока тепла.

Увеличение интенсивности диффузии, задаваемой величиной K , также приводит к увеличению толщины верхнего квазиоднородного слоя и понижению его температуры, но при этом происходит "размывание" слоя скачка, о чём свидетельствует уменьшение значений вертикального градиента температуры в нём.

При положительных значениях потока тепла отмечается прогрев и уменьшение толщины верхнего квазиоднородного слоя с увеличением градиента температуры в верхней части сезонного термоклина. Увеличение скорости ветра и интенсивности диффузионных процессов приводят к заглублению нижней границы верхнего квазиоднородного слоя с понижением температуры в нём, но с меньшей скоростью, чем в случае отсутствия или отрицательного потока тепла в океан.

Результаты расчёта по варианту (А) неустойчивы при небольших значениях скорости ветра и коэффициента K . Этот вариант даёт надёжные результаты в случаях, когда происходящие процессы должны вызывать заглубление нижней границы верхнего квазиоднородного слоя, что имеет место при сильном динамическом (штормовом) воздействии, или в случае развития конвекции.

Результаты расчётов по варианту (В) устойчивы при малых значениях скорости ветра, а также при положительном знаке потока тепла. Эта ситуация чаще всего наблюдается в летний период.

Вариант (В) модели можно рекомендовать для применения в период прогрева.

В четвертой главе приводятся результаты расчетов вертикального распределения температуры деятельного слоя Северной Атлантики для периода весенне-летнего прогрева по варианту (В) разработанной модели.

По климатическим данным о ветре, температуре воды и воздуха рассчитаны среднесезонные значения функции Ψ и величины $\Gamma_{h.0}$ для акватории Северной Атлантики, ограниченной параллелями 20° и 60° с.ш. на равномерной сетке с шагом по широте $2,5^\circ$ и по долготе 5° .

Анализ карт характеристик сезонного термоклина за июнь-сентябрь показывает, что основное влияние на пространственное распределение функции Ψ оказывают характеристики на нижней границе деятельного слоя. Временная изменчивость связана с изменениями характеристик на верхней границе сезонного термоклина, в первую очередь, температуры T_s .

Расчеты с синоптическим масштабом осреднения проводились по среднесуточным данным, полученным на океанской станции "С" в августе 1978 г. Изменения глубины нижней границы верхнего квазиоднородного слоя следуют изменениям скорости ветра и потока тепла. Периоды ее резкого заглубления соответствуют максимальным значениям скоростей ветра. Температура верхнего квазиоднородного слоя в этих случаях понижается, функция Ψ - возрастает, что приводит к увеличению градиента в слое скачка.

Натурные данные и результаты расчетов по модели имеют хорошее количественное и качественное совпадение. Так, реальные и прогностические ряды величин h и T_s имеют соответствен-

но коэффициенты корреляции 0,91 и 0,82.

Осуществлены расчеты среднемесячных значений h , T_s ,

Γ_{h-o} , ψ по данным за 1976, 1980, 1981 и 1982 гг.

При этом выполнялась оценка обеспеченности расчетов температуры верхнего квазиоднородного слоя. Анализ данных показал, что температурный режим Северной Атлантики в период 1980-1982 гг. был близок к норме. Это позволило рассматривать ошибки расчетов как следствие действия неучтенных механизмов его формирования, в частности, адвекции тепла течениями. Осредненные ошибки были использованы в дальнейшем в качестве адвективных поправок.

В 1976 г. отклонение T_s от климатических значений менее, чем на 1°C (Гетман, 1984), составило 68%, что свидетельствует об аномальности условий в этот период. Поэтому результаты расчетов с точки зрения использования модели в этом случае наиболее показательны. Расчетные данные имеют среднегодовую обеспеченность, равную 78%. В июне-июле обеспеченность расчетов равна 84 и 78% при климатической - 78 и 54% соответственно. Учет адвективных поправок повышает обеспеченность расчетов на 5 - 10%.

Исследован вопрос о способе параметризации коэффициента теплообмена на верхней границе сезонного термоклина. При этом рассматривались следующие виды задания коэффициента K :

$$K = 0; \quad K = 5 \cdot 10^{-4} \text{ В}^3; \quad K = 10^{-3} \text{ В}^3; \quad K = f(\Gamma_{h-o}).$$

Анализ результатов показал, что лучшую обеспеченность имеют расчеты с использованием вида задания коэффициента K , как функции от вертикального градиента температуры в сезонном термокline.

Значения толщины верхнего квазиоднородного слоя и градиента Γ_{h-o} , полученные при обработке вертикальных среднемесячных профилей температуры на океанской станции "С" за этот период совпадают с общей картиной распределения указанных характеристик.

Таким образом, результаты, полученные при расчетах по натурным данным, свидетельствуют о хорошей обеспеченности метода

В заключении формулируются основные научные результаты работы:

1. Исследования синоптической и сезонной изменчивости параметров вертикальной термической структуры деятельного слоя океана по данным натурных наблюдений в Северной Атлантике показали необходимость учета пространственно-временной изменчивости величин, параметризующих распределение температуры в сезонном термокline. Амплитуда изменчивости параметра автономности, значение которого, обычно, принимается постоянным, для этих масштабов осреднения составляет 40-50% от его среднего значения.

2. Разработан метод параметризации вертикального распределения температуры в сезонном термокline, позволяющий описывать профили температуры, характерные для различных термических структур и на различных стадиях развития сезонного термоклина и обобщающий ранее предлагаемые способы полиномиальной параметризации.

3. Предложен метод описания потока тепла на нижней границе верхнего квазиоднородного слоя в процессе вовлечения для непрерывного профиля температуры в деятельном слое океана.

4. Создана двухслойная, энергетически замкнутая модель расчета и прогноза вертикального распределения температуры в

дейтельном слое океана в двух вариантах (А и В) на основании разработанных методов параметризации. Выполненные численные эксперименты показали, что первый более целесообразно использовать в период осенне-зимнего выхолаживания, второй - в период весенне-летнего прогрева.

5. Осуществленные по натурным данным расчеты для Северной Атлантики и океанской станции "С" показали применимость разработанной модели для описания процессов синоптического и сезонного масштабов. Обеспеченность расчетов по среднемесячным данным на 10-15% выше обеспеченности климатического прогноза. При расчетах на синоптическом масштабе осреднения реальные и расчетные ряды величин толщины верхнего квазиоднородного слоя и его температуры имеют коэффициенты корреляции 0,91 и 0,82 соответственно.

По теме диссертации опубликованы следующие работы .

1. Бондаренко Н.Н., Калацкий В.И. Моделирование синоптических изменений вертикального распределения температуры в верхнем термокLINE. - Труды ГИД СССР, 1978, вып.200, с.9-15.

2. Бондаренко Н.Н., Полежаев Е.К. Изменчивость термической структуры деятельного слоя океана по данным наблюдений на Тропическом энергетическом полигоне. - Труды ГОИН, 1983, вып.170, с.17-26.

3. Бондаренко Н.Н., Калацкий В.И. О параметризации вертикального распределения температуры в сезонном термокLINE. - Деп. ВНИИГМИ М.Д., 1984, 301 ГИ-Д84, 16 с.

4. Бондаренко Н.Н., Полежаев Е.К. Пространственно-временная изменчивость параметров деятельного слоя океана в районе Тропического энергетического полигона. - Труды ГОИН, 1985, вып.173, с.179-86.

5. Бондаренко Н.Н. Параметризация вертикального профиля температуры в слое сезонного термокLINE. - В кн.: Итоги науки и техники. Серия "Атмосфера, океан, космос - программа "Разрезы", т.7, М.: изд ВИНТИ, 1986, с.288.

6. Бондаренко Н.Н. Моделирование вертикального распределения температуры в сезонном термокLINE. - Труды ГОИН, 1987, вып.181, с. 6-74.

