

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА

Географический факультет

На правах рукописи

**ГЕМИШ
Юрий Васильевич**

УДК 551.465.41(261.1)

СЕЗОННЫЙ ТЕРМОКЛИН СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

Специальность 11.00.08 — океанология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Подписано к печати 25.10.89 ТБ-02944 формат 60x84/16
Печать офсетная Бумага картогр. Печ.л. 1,25
Зак. 1346 Тир. 100 Бесплатно

Фабрика офсетной печати ВНИИГМИ-МЦД
249020 г. Обнинск, ул. Королева, 6

Москва — 1989

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена во Всесоюзном научно—исследовательском институте гидрометеорологической информации — Мировом центре данных.

Научный руководитель — доктор географических наук, профессор А. И. ДУВАНИН

Официальные оппоненты: доктор географических наук, профессор В. Н. СТЕПАНОВ кандидат физико-математических наук, с.н.с. Е. С. НЕСТЕРОВ

Ведущая организация: Государственный океанографический институт

Защита состоится « 7 » *декабря* 1989 г. в 15 часов на заседании специализированного гидрометеорологического совета Д 053.05.30 при Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова по адресу: 119899, Москва, Ленинские горы, МГУ, географический факультет, 18-й этаж, ауд. 1801.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке географического факультета МГУ на 21-м этаже.

Автореферат разослан « 3 » *ноября* 1989 г.

Ученый секретарь специализированного ги при МГУ, кандидат г

А
К
КСЕЕВА

Актуальность темы. Сезонный термоклин (СТ) является важнейшим элементом вертикальной термической структуры океана. Рас-
тущее понимание роли СТ в общей климатической системе привело в 60-х годах к настоящему буму в его изучении. При этом сфор-
мировались три основных направления в исследовании сезонного термоклина - математическое моделирование, анализ данных экс-
педиционных наблюдений, получение климатологических обобщений. Наибольшее развитие получило математическое моделирование. Два
других направления развивались менее интенсивно, что создало определенную диспропорцию между теорией вопроса и его факти-
ческой стороной. Возникла проблема оценки многочисленных пара-
метров СТ, используемых при мониторинге деятельного слоя океа-
на (ДСО), при разработке моделей термоструктуры и применении их на практике. В частности, дальнейший прогресс в развитии
наиболее распространенного интегрального подхода к моделирова-
нию термоструктуры исследователи связывают с получением данных о "климате" таких характеристик СТ, как глубина залегания его
верхней и нижней границ, температура на этих границах, параметр
автомодельности, максимальный градиент температуры и многих
других. Некоторые из этих характеристик с климатической точки
зрения исследовались в разное время и с различной степенью
подробности, другие практически не изучены. Имеющиеся резуль-
таты эпизодичны и фрагментарны, получены на основе самых раз-
нородных методик и наборов исходных данных и во многих случаях
не сопоставимы по пространственно-временным масштабам осредне-
ния. Другой важный вывод заключается в том, что за всю историю
изучения океана в климатолого-статистическом аспекте СТ, в
отличие от квазиоднородного слоя, широко не исследовался как
единое целое, как особая структурная зона, развивающаяся по
своим специфическим законам. С одной стороны, это объясняется
отсутствием общепринятой методики комплексного изучения сезон-
ного термоклина. Отдельные работы в этом направлении (Филлюшкин,
1968; Степанов и др., 1984; Белкин, Филлюшкин, 1986) лишь намети-
ли пути решения методологической проблемы, однако, существен-
ного развития и тем более логического завершения указанный
подход пока не получил. Другим сдерживающим фактором стал не-
достаток исходных данных, что до недавнего времени не позволя-

ВНИРО
№ *103*
Библиотека

ло получать климатологические обобщения по СТ для обширных акваторий. Даже для такого хорошо освещенного наблюдениями региона, как Северная Атлантика, подобные работы выполнялись лишь для океанических станций погоды (ОСП) (Тужилкин, 1978; Иванов, Тужилкин, 1979) и районов специализированных экспериментов (Хлыстов, 1976; Белкин, Филюшкин, 1986).

С особой остротой все эти вопросы были поставлены в 1982 году на втором съезде советских океанологов, где среди основных задач современной океанологии отмечалась настоятельная потребность в изучении жизни сезонного термоклина всего Мирового океана, в определении районов его максимальной изменчивости (Марчук, 1982). Констатация этого факта, а также отсутствие целостных климатологических обобщений по СТ для обширных акваторий и определяет актуальность темы, вынесенной в заголовок настоящей работы.

Цели и задачи исследования. Основной целью работы является комплексный климатолого-статистический анализ сезонного термоклина Северной Атлантики на основе наиболее полного отечественного массива глубоководных океанографических данных. В ходе выполнения работы, в соответствии с поставленной целью, решались следующие задачи: всесторонний анализ современных подходов к изучению СТ и определение места климатологических обобщений в общей иерархии знаний о процессах, протекающих в верхних слоях океана; разработка методики контроля и первичной обработки исходных данных с целью отбора вертикальных профилей, пригодных для исследования СТ; разработка методики определения всех важнейших характеристик СТ по единичному профилю температуры и последующей их статистической обработки; реализация упомянутых методик в виде программного комплекса и расчеты на ЭВМ; картирование и собственно анализ полученных результатов; подготовка Атласа "Сезонный термоклин Северной Атлантики".

Научная новизна. Поставленная цель имеет научную новизну, заключающуюся как в самом подходе к изучаемой проблеме, так и в полученных результатах. Комплексный климатолого-статистический анализ сезонного термоклина Северной Атлантики выполнен впервые. Выявлены физико-географические закономерности пространственно-временной изменчивости всех наиболее важных характеристик СТ. Исследована гипотеза об автомодельности профиля температуры в СТ в сезонном масштабе времени и определены пе-

риоды ее выполнимости. Обнаружена значимая статистическая связь между отдельными параметрами термоклина. В климатологическом аспекте впервые выполнен анализ пространственно-временной изменчивости теплозапаса таких структурных зон, как деятельный слой океана, верхний квазиоднородный слой (ВКС), сезонный термоклин. Выделены районы максимальной изменчивости характеристик СТ и обосновано использование некоторых из них в качестве критерия для идентификации энергоактивных зон океана (ЭАЗО).

Практическая ценность работы заключается в подробном описании крупномасштабных черт пространственного и временного распределения всех важнейших характеристик СТ. Полученные результаты могут быть использованы: в качестве справочного материала при климатическом мониторинге океана и изучении сезонной изменчивости ДСО; при разработке новых и усовершенствовании имеющихся моделей термической структуры деятельного слоя; для параметризации СТ в моделях крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы; для восстановления в первом приближении профиля температуры по одному или нескольким параметрам СТ.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на Всесоюзном совещании пользователей океанографической информации (Обнинск, 1985, 1989 гг.), на семинаре кафедры океанологии географического факультета МГУ (1985, 1986 гг.), на конференции молодых ученых ВНИИГМИ-МЦД (1986, 1987 гг.), на семинаре Лаборатории динамики океана ОВМ АН СССР (1986).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа содержит 155 страниц машинописного текста, 84 рисунка, 10 таблиц. В списке литературы 220 наименований, из них 88 на английском языке. Приложение содержит 176 карт.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели исследования, указаны основные положения, которые автор выносит на защиту.

Первая глава посвящена аналитическому обзору современных методов и подходов в изучении сезонного термоклина.

В разделе 1.1 анализируются имеющиеся сведения об особенностях вертикальной термической структуры ДСО, рассматриваются

физические процессы, формирующие слой скачка и сезонный термоклин, методы определения характеристик СТ по натурным данным. Обсуждаются механизмы влияния конвективно-ветровых движений, процессов теплообмена, течений, внутренних волн и других факторов на формирование и эволюцию сезонного термоклина. Показано, что годовой цикл эволюции СТ исследовался лишь в отдельных, хорошо обеспеченных данными наблюдений, точках и ограниченных регионах; обобщений для таких акваторий, как Северная Атлантика не проводилось. При определении характеристик СТ по единичным профилям температуры наибольшую трудность представляет выделение его границ. Этим в значительной степени определяется многочисленность применяемых на практике методов и критериев, большинство из которых рассмотрено в диссертации.

В разделе 1.2 рассматриваются модели СТ и приводится их классификация. Показано, что во всех интегральных моделях в качестве параметров настройки используются многие характеристики СТ, а дальнейший прогресс в теоретическом изучении термоструктуры связан с получением данных о "климате" сезонного термоклина. Особое внимание уделено анализу литературных источников, посвященных гипотезе об автономности профиля температуры в СТ.

В последнем разделе главы обсуждаются работы в области климатологии СТ. Имеющиеся результаты эпизодичны и разрозненны. Отсутствуют работы, посвященные совместному анализу основных характеристик СТ и комплексному исследованию сезонного термоклина, как особой структурной зоны океана.

Вторая глава носит методический характер. В ней описываются исходные данные, приводятся алгоритмы их контроля и первичной обработки. Большая часть главы посвящена описанию комплексной методики определения характеристик СТ по единичному профилю, методам статистической обработки и оценки погрешностей.

В качестве исходных данных использовался массив глубоководных батометрических наблюдений объемом около 300 тыс. станций за 1900-1983 гг., хранящийся во ВНИИГМИ-МЦД. В нашей стране это единственный массовый и наиболее полный источник глубоководных наблюдений, записанных на магнитную ленту.

Необходимым этапом обработки больших объемов информации на ЭВМ является обязательный контроль качества исходных данных. В работе были применены следующие виды контроля: синтаксический

и структурный; контроль на наличие дублирующих станций; трехступенчатый смысловой (на общие пределы, на широтные пределы, инверсионный контроль); специализированный. Это позволило отобрать около 100 тыс. наиболее качественных профилей температуры, пригодных для исследования сезонного термоклина. Остальные станции либо не удовлетворяли таким критериям, как необходимая глубина зондирования и максимально допустимая дискретность по вертикали, либо имели ошибки в наблюдаемых значениях.

Отобранные профили сортировались по пятиградусным трапециям Марсдена, а внутри них по времени. Данные крайне неравномерно распределены по акватории. Наибольшее число наблюдений сосредоточено в районе Норвежской ЭАЭО, у берегов Северной Америки, Африки и в районах ОСП. К центру океана сеть наблюдений заметно редет и достигает минимума в тропиках. 89% трапеций содержат от 50 до нескольких тысяч наблюдений, что позволяет получить вполне надежные статистические оценки характеристик СТ. Освещенность во времени более равномерна: 64% трапеций содержат наблюдения в каждом месяце, 24% - в 10-11 и, 8% - в 8-9 месяцах.

В рамках климатологического обобщения для выделения СТ, как элемента термической структуры, был использован метод характерных точек, заключающийся в предварительном определении всех характеристик СТ по единичному профилю с последующей их статистической обработкой. По каждому единичному профилю определялись следующие характеристики СТ: глубина залегания верхней и нижней границ (h, H), температура на этих границах (T_h, T_H), максимальный градиент температуры (D_{max}) и глубина его залегания (Z_D), параметр автономности (L), толщина СТ ($H-h$), разность температур поверхность-верхняя граница ($T_0 - T_h$). Затем производилась статистическая обработка полученных характеристик СТ. Исходя из общего числа используемых данных и их распределения, были выбраны следующие масштабы осреднения: по пространству - пятиградусная трапеция; по времени - многолетний месяц.

Как отмечалось выше, наибольшую трудность представляет определение глубины залегания верхней и нижней границ СТ, а также расчет параметра автономности. Остановимся на этих вопросах более подробно.

В качестве критерия определения верхней границы выбран лог-

кальный экстремум кривизны, предложенный Тужилкиным (1979),

$$R = (d^2T/dz^2) / [1 + (dT/dz)^2]^{3/2},$$

где T - температура, z - глубина. Величина R , как правило, характеризует область перехода от ВКС к СТ. Однако, в ряде случаев вертикальный профиль температуры может иметь один или несколько вторичных слоев скачка синоптического происхождения и, соответственно, несколько локальных экстремумов кривизны, что увеличивает вероятность ложного выбора h при автоматизированной обработке. Для повышения надежности метода предложено сузить область поиска R за счет предварительного определения его верхней и нижней окрестностей (Кузнецов, 1982): критерий выбора верхней окрестности - $Z|dT/dz| < 0.5 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}$; критерий выбора нижней окрестности - $-Z|dT/dz| = \max$. Описанный метод апробирован на различных типах профилей и показал хорошие результаты. Исключения составляют профили, для которых характерен очень плавный переход от ВКС к СТ. В таких случаях получается неоправданно завышенное значение h . В настоящей работе удалось обойти этот нежелательный эффект введением другого критерия выбора нижней окрестности $|T_0 - T_h| \leq 1^\circ\text{C}$. При анализе единичного профиля сезонный термоклин считался отсутствующим, если локальный экстремум кривизны располагался ниже глубины залегания нижней границы СТ. В этом случае ДСО изотермичен и локальный экстремум характеризует переход от ВКС к главному термоклину.

Среди методов определения нижней границы СТ (ДСО) наиболее физически обоснованным является амплитудно-гармонический метод. К сожалению, он требует наличия длинных временных рядов и не применим в районах с интенсивной адвекцией, а также в тропических и высоких широтах, где амплитуда колебаний температуры невелика. Для того чтобы получить топографию нижней границы СТ всей Северной Атлантики, в настоящей работе применен более формализованный, градиентный метод, суть которого заключается в определении горизонта, на котором значение D_{\max} уменьшается в K раз. Трудность этого подхода связана с подбором оптимального значения коэффициента K . С физической точки зрения наиболее обоснованным представляется значение $K=0.7$, полученное Украинским (1985). В данной работе на каждом профиле выделялась область D_{\max} и горизонт H_i , где значение D_{\max} уменьшается в 0.7 раза. Затем в каждой пятиградусной трапеции для ряда $\{H_i\}$ на-

ходилась среднее значение (\bar{H}_i) и стандартное отклонение (b_{H_i}), а глубина залегания нижней границы СТ определялась по формуле $H = \bar{H} + b_{H_i}$. Метод дает удовлетворительные результаты, о чем свидетельствует сравнение с величинами H , полученными амплитудно-гармоническим методом в 14 трапециях и в районе ОСП "С".

Существенным шагом в изучении сезонного термоклина стала гипотеза об автомодельности. Китайгородский, Миропольский (1970), анализируя сглаженные профили температуры в СТ в безразмерных координатах

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

где z - глубина, обнаружили, что эти профили хорошо группируются около некоторой кривой $\theta(\eta)$, описываемой полиномом 4-й степени. Согласно гипотезе автомодельности, безразмерная температура θ зависит только от безразмерной координаты η и не зависит от времени, т.е. $\theta = \theta(\eta)$. Это означает, что одна функция $\theta(\eta)$ и характеристики верхней и нижней границы СТ (h, T_h, H, T_N) можно получить значения температуры на любом горизонте СТ и в любой момент времени. При моделировании, однако, имеет значение не сама функция $\theta(\eta)$, а ее интегральная безразмерная характеристика α , называемая параметром автомодельности

$$\alpha = \int_0^1 \theta(\eta) d\eta, \quad 0 \leq \alpha \leq 1.$$

Потребности моделирования предъявляют весьма высокие требования к точности экспериментального определения α . При расчете α по натурным данным профиль температуры в СТ обычно аппроксимируют кусочно-линейной функцией, а интегрируют методом трапеций. В данной работе единичные профили $T(z)$ аппроксимировались кубическим сплайном, а интегрирование производилось методом сплайн квадратуры (Форсайт, 1980). Это позволило получить существенный выигрыш в точности расчета α . Показано также, что минимальное число точек на аппроксимируемом профиле, включая и граничные, не должно опускаться ниже четырех. В противном случае информативность профиля становится недостаточной, что ведет к резкому увеличению погрешностей расчета характеристик СТ.

Специальный раздел второй главы посвящен оценке и анализу погрешностей, возникающих при измерениях, расчете и статистическом обобщении характеристик СТ. Интерес к этому вопросу в последнее время значительно вырос в связи с появлением схем

четырёхмерного анализа океанографических данных и их усвоения в динамико-стохастических моделях, что требует знания возможных погрешностей используемых данных и их отбраковки в случае несоответствия заданным критериям. В работе предложена методика оценки максимальных погрешностей определения характеристик СТ (h, T_h, H, T_H) по единичным профилям. На основе теории ошибок (Тейлор, 1985) получены выражения, позволяющие оценить вклад погрешностей определения характеристик верхней и нижней границ СТ в погрешность расчета параметра автономности. Показано, что наибольший вклад (80-90%) в погрешность расчета α вносит погрешность определения глубины залегания верхней границы и температуры на ней. Предлагаемая методика позволяет планировать вычисления с заданной точностью, производить фильтрацию исходных данных в соответствии с условиями задачи и тем самым добиваться оптимальных результатов.

При статистическом обобщении единичных данных возникают погрешности расчета средних значений ($\delta\bar{x}$) и стандартных отклонений ($\delta\sigma_x$). В диссертации приводятся среднемноголетние карты $\delta\bar{x}$. Погрешности расчета средних значений всех характеристик СТ намного меньше их годовой изменчивости и подчиняются некоторым общим закономерностям. В общих чертах величины погрешностей увеличиваются от окраин океана к центру, что связано с уменьшением числа наблюдений в этом же направлении; повышенные значения характерны также для очагов значительной изменчивости элементов СТ (фронты, ЭАЭО, районы апвеллинга и др.).

В третьей главе приводятся результаты анализа полей средних значений и стандартных отклонений следующих характеристик сезонного термоклина: глубины залегания его верхней и нижней границ, температур на этих границах, максимального градиента температуры и глубины его залегания, толщины (мощности) СТ, параметра автономности, разности температур поверхность-верхняя граница. Поля рассчитаны для каждого многолетнего месяца, а картированы для января, апреля, июля, октября и года в целом. Рассматриваются особенности формирования и эволюции СТ, анализируются статистические связи между его характеристиками.

Эволюция сезонного термоклина в течение года характеризуется четырьмя основными периодами (образование СТ, устойчивое существование, разрушение, отсутствие). В качестве основного критерия выделения характерных периодов использовалось среднее

значение максимального градиента температуры в СТ. Сезонный термоклин считается устойчиво существующим, если $\Delta_{\max} > 0.05$ °С/м (Филешкин, 1968; Степанов и др., 1982). За период образования СТ принимался месяц, в котором $\Delta_{\max} = 0.05$ °С/м с тенденцией дальнейшего увеличения градиента и толщины СТ. Месяц, в котором $\Delta_{\max} = 0.05$ °С/м с последующей тенденцией уменьшения градиента и толщины СТ, считался периодом разрушения термоклина. Период отсутствия СТ характеризуется полной изотермией ДСО с градиентами в нем не более 0.02 °С/м.

По характеру эволюции СТ акватория Северной Атлантики делится на две части границей, проходящей в районе 30-40° с.ш. и в целом совпадающей с нулевой изолинией годового бюджета тепла поверхности океана. Севернее этой границы термоклин испытывает значительную сезонную изменчивость, обусловленную осенне-зимней конвекцией, а его генезис включает все четыре периода (образование, устойчивое существование, разрушение, отсутствие). В районах расположенных южнее параллели 30-40° с.ш. термоклин устойчиво существует в течение всего года и отличается гораздо меньшей изменчивостью его элементов.

Сезонная миграция границ областей, подверженных процессам образования и разрушения СТ, имеет довольно хорошо выраженную зональность, однако, пространственно - временные особенности развития этих процессов существенно различны: образование термоклина происходит более скоротечно и одновременно охватывает гораздо большую акваторию по сравнению с процессом разрушения. Образование СТ осуществляется в течение четырех месяцев (апрель-июль), причем наиболее интенсивно в апреле-мае, охватывая в месяц, соответственно, 26 и 54% пятиградусных трапеций, расположенных севернее 30-40° с.ш.. Разрушение СТ более длительный процесс, наблюдаемый в течение семи месяцев (сентябрь-март) и охватывающий одновременно не более 26% трапеций в месяц, что в два с лишним раза меньше величины, характерной для процесса образования. Севернее 30-40° с.ш. период устойчивого существования СТ колеблется от одного месяца в районе о.Гренландия до 8-10 месяцев в субтропической области; для большей части упомянутой акватории характерен период 5-6 месяцев.

Впервые получена детальная топография нижней границы СТ. Глубина залегания нижней границы зависит от особенностей крупномасштабной циркуляции, интенсивности взаимодействия в

системе океан - атмосфера и колеблется от 100 м у западного побережья Африки до 400 м на северо-западной периферии субтропического антициклона. Топография H хорошо согласуется с расположением макроциркуляционных систем - в антициклонических круговоротах нижняя граница располагается на значительно больших глубинах, чем в циклонических. Области опускания вод в большинстве случаев совпадают с ложбинами в топографии H , а области подъема - с гребнями. Общая тенденция - увеличение глубины залегания нижней границы с ростом широты. В экваториальной области среднеширотные значения H составляют 140-150 м, в тропической зоне относительно монотонно увеличиваются от 160 до 230 м и в субтропиках (35-40° с.ш.) достигают максимума в 240-250 м, оставаясь на этом уровне вплоть до 55-60° с.ш. В высоких широтах величина H несколько уменьшается и составляет 230 м. В среднем для Северной Атлантики нижняя граница СТ располагается на глубине 210 м.

Температура на нижней границе зависит от широты места, особенностей циркуляции и глубины залегания нижней границы. Наибольшие значения T_H наблюдаются в южной части субтропического антициклонического круговорота (>18°C), а наименьшие - в субарктическом циклоне (4-2°C). Изотермы имеют довольно хорошо выраженное широтное простираие на большей части исследуемой акватории. Однако, в восточном экваториально-тропическом районе зональность существенно нарушается в результате адвекции холодных вод Канарским течением с севера. Направленность изотерм имеет в этом случае преобладающую меридиональную ориентацию. Севернее 40-45° с.ш. коррективы в широтный ход вносит адвекция теплых вод Гольфстримом и Северо-Атлантическим течением, и чем далее на север, тем заметнее становится северо-восточная ориентация изотерм. По сгущению изотерм очень хорошо прослеживается субарктический фронт в районе южнее и восточнее о. Ньюфаундленд. Здесь теплые воды Гольфстрима взаимодействуют с холодным Лабрадорским течением, что обуславливает возникновение здесь самых больших для Северной Атлантики горизонтальных градиентов T_H . Сравнение полей T_H для различных месяцев показывает отсутствие сколь-нибудь существенных различий. Смещение изотерм к северу при переходе от холодного полугодия к теплоту практически незаметно, что свидетельствует о довольно высокой стабильности поля T_H . На подавляющей части акватории

стандартные отклонения температуры не превышают 1°C, что подтверждает правильность выбора нижней границы СТ. Исключение составляют ограниченные и весьма сложные в динамическом отношении районы, где сезонная изменчивость T_H достигает 2-4°C (фронтальные зоны, районы струйных течений).

Если положение нижней границы в большей степени определяется крупномасштабной циркуляцией, то глубина залегания верхней границы СТ практически полностью зависит от интенсивности теплового и динамического взаимодействия океана и атмосферы. Специфика такого взаимодействия, как отмечалось выше, позволяет разделить акваторию на две части с границей, проходящей в районе 30-40° с.ш. Южнее этой границы СТ существует в течение всего года и характеристики его верхней границы испытывают относительно небольшие сезонные колебания; севернее - в результате осенне-зимней конвекции СТ периодически разрушается, что обуславливает значительную изменчивость его характеристик в сезонном масштабе времени. В экваториально-тропическом районе величина h возрастает с востока на запад, что согласуется с теоретической моделью Гарвуда, Галлахера, Мюллера (1985) и объясняется действием устойчивых восточных пассатов. В январе она возрастает от 25 м у западного побережья Африки до 75 м у Малых Антильских островов и у побережья Южной Америки; в июле в этих же районах значения h уменьшаются до 10 и 50 м соответственно. Летом ветер над Северной Атлантикой значительно ослабевает, и верхняя граница СТ локализуется в верхнем 25-метровом слое на большей части исследуемой акватории. Среднеширотные значения h возрастают от 40 м в экваториальной зоне до 130 м в высоких широтах; от 15 до 98 м возрастают и средние широтные значения стандартного отклонения h . Очаги максимальной изменчивости h в основном совпадают с местоположением ЭАЭО.

Среднегодовые значения разности температур поверхность-верхняя граница на большей части акватории положительны и не превышают 0.8°C. Исключением является северо-западный район, где разность отрицательна и достигает -1°C. Инверсия температуры в ВКС здесь объясняется наличием теплого подповерхностного слоя североатлантических вод, подстилающего холодные и распресненные поверхностные воды Лабрадорского течения. По-видимому, наличие инверсии и, как следствие, хорошо развитого турбулентного режима в некоторой степени объясняет типичные для этого

района профили $T(z)$ с резко выраженным переходом от ВКС к СТ.

Максимальный градиент температуры в СТ является важнейшим элементом термической стратификации, отражающим влияние процессов теплообмена, конвективно-ветрового перемешивания, адвекции тепла течениями, вертикальной циркуляции. Однако, до сих пор в связи со слабой изученностью СТ в климатическом аспекте, исследованию его градиентов уделялось также недостаточно внимания. Существующая практика в этой области связана с построением полей градиентов для стандартных слоев (0-10, 10-25, 25-50 м и т.д.), в результате чего такое поле может быть отнесено в одном районе океана к СТ, в другом - к ВКС, в третьем - к главному термоклину. С другой стороны осреднение градиентов в масштабе многолетнего года без учета периода отсутствия СТ (Арсеньев и др., 1980, 1984) обуславливает существенное занижение характерных для слоя скачка значений градиентов. Используемый в данной работе метод характерных точек позволил избежать всех этих недостатков и проследить эволюцию слоя максимальных градиентов в СТ в течение года.

В поле средних годовых значений D_{\max} можно выделить ряд характерных областей. Это, прежде всего, чрезвычайно сложный в динамическом отношении экваториально-тропический район. Положительный бюджет тепла поверхности океана, небольшие по величине, но устойчивые пассатные ветры, процессы апвеллинга обуславливают наличие здесь самых больших для Северной Атлантики значений D_{\max} . Так у побережья Африки и в Гвинейском заливе градиенты достигают $0.35^\circ\text{C}/\text{м}$ и более за счет перераспределения поступающего в океан тепла в тонком приповерхностном слое, сгонного эффекта пассатных ветров и подъема вод в восточно-тропическом циклоническом круговороте. Еще одна область повышенных значений D_{\max} ($0.20-0.30^\circ\text{C}/\text{м}$) наблюдается в районе банок Джорджес и Большой Ньюфаундлендской. Резкое обострение стратификации в СТ здесь объясняется наличием холодного подповерхностного слоя, обусловленного мощным субарктическим фронтом, отрицательным бюджетом тепла поверхности океана и усиленным ветровым режимом. В зоне действия Гольфстрима наблюдаются относительно небольшие градиенты ($0.10-0.15^\circ\text{C}/\text{м}$), а в Северо-Атлантическом течении они не превышают $0.10^\circ\text{C}/\text{м}$.

Области наибольших годовых значений стандартных отклонений D_{\max} совпадают с областями его наибольших средних значений

($\delta D_{\max}=0.10-0.20^\circ\text{C}/\text{м}$). На большей же части акватории значения δD_{\max} колеблются в пределах $0.05-0.10^\circ\text{C}/\text{м}$, достигая минимума на южной периферии субтропического антициклона ($0.025^\circ\text{C}/\text{м}$).

Поле глубины залегания D_{\max} имеет заметное сходство с полем глубины залегания верхней границы СТ. Об этом свидетельствует также синхронность и подобие графиков среднеширотных значений h и Z_p . Толщина слоя скачка ($Z_p - h$) уменьшается от 40 м в экваториально-тропической зоне до 5-10 м в районах, расположенных севернее 30-й параллели. Таким образом, в умеренных и высоких широтах область максимальных градиентов как бы "поджата" снизу к верхней границе СТ, что обеспечивает высокую корреляцию между h и Z_p и резкий излом профиля температуры между ВКС и СТ. Напротив, в экваториально-тропических областях, где мощность слоя скачка велика, переход от ВКС к СТ более гладок и размыт.

Очаги экстремальных значений в годовом поле стандартных отклонений Z_p совпадают с аналогичными областями годового поля средних значений. Минимальная изменчивость ($\delta Z_p < 15$ м) отмечается в восточно-тропическом циклоне, а максимальная (>150 м) наблюдается на северной периферии субтропического антициклона.

Поле толщины сезонного термоклина (ТСТ) отражает основные особенности топографии его верхней и нижней границ. В экваториально-тропической зоне ТСТ увеличивается с востока на запад от 75 до 200 м. В умеренных и высоких широтах основные очаги повышенных значений ТСТ расположены в зоне действия Гольфстрима и Северо-Атлантического течения. Один из них с мощностью термоклина 175 м отмечается в районе Бермудских островов, другой приурочен к дельте Гольфстрима (ТСТ > 200 м). По ходу основной ветви Северо-Атлантического течения расположены еще две области повышенных значений ТСТ - несколько южнее разлома Гибса (ТСТ > 200 м) и в южной части Норвежского моря (ТСТ > 150 м). Минимальные значения ТСТ отмечаются в шельфовых зонах Северной Америки, Европы, Африки и не превышают 75 м. Из общих закономерностей пространственной изменчивости следует отметить увеличение ТСТ от окраин океана к его центральным областям. Мощность сезонного термоклина в целом больше в антициклонических макроциркуляционных системах и меньше - в циклонических.

Специальный раздел третьей главы посвящен детальному анализу пространственно-временной изменчивости параметра автомо-

дельности и проверке осуществимости гипотезы об автомодельности в отдельных районах акватории и в отдельные сезоны.

Параметр α является уникальной в своем роде величиной, позволяющей описать сезонный термоклин как единое целое, заменяющей ряд характеристик СТ и объективно отражающей закономерности гидрологического режима. Особенно часто он используется для параметризации СТ в моделях термоструктуры ДСО. В то же время модели оказались весьма чувствительными к точности задания параметра α . Так, например, использование в моделях его теоретического значения ($\alpha = 0.73$) дает во многих случаях лишь качественно верные результаты; в отличие от этого учет широтного хода позволяет улучшить качество диагноза термоструктуры на 20-30% (Нестеров, Калацкий, 1975). Этот факт в значительной мере стимулировал исследования в области пространственно-временной изменчивости α , однако, акцент был сделан на синоптических и мезо масштабах, хотя авторы гипотезы сформулировали ее применительно к сезонному масштабу времени. Что касается последнего, то работа Миропольского, Филушкина, Чернышкова (1970), выполненная по материалам двух станций погоды в Тихом океане, является первой и единственной в своем роде. Пространственной изменчивости также посвящено единственное исследование (Нестеров, Калацкий, 1975), осуществленное, однако, на весьма ограниченном материале (11 точек по акватории Северной Атлантики).

В настоящей работе впервые получены поля средних значений и стандартных отклонений α для всех многолетних месяцев и года в целом.

Годовое поле α имеет довольно сложную структуру. Экваториально-тропический район характеризуется преимущественно меридиональным ходом изолиний с небольшими горизонтальными градиентами, причем значения α уменьшаются с востока на запад от 0.60 до 0.50-0.55 (абсолютный минимум для Северной Атлантики). Эта особенность поля полностью объясняется аналогичными закономерностями в топографии верхней и нижней границ СТ. Зона 20-30° с.ш. отличается хорошо выраженным широтным ходом изолиний, а значение α увеличивается с юга на север от 0.55 до 0.70. Горизонтальные градиенты α здесь довольно велики и уступают только градиентам субарктического фронта. Следует отметить, что это единственный район Северной Атлантики, где наблюдается широтное простиранье изолиний α . Таким образом, вывод Нестеро-

ва и Калацкого (1970) о ярко выраженном широтном ходе α практически на всей акватории не подтверждается. Севернее 30-й параллели поле α имеет наиболее сложную конфигурацию. Здесь прежде всего необходимо отметить район субарктического фронта, где горизонтальные градиенты параметра автомодельности максимальны (до 0.05 на 1° сетки), а само значение колеблется в пределах 0.75-0.85. Ближе о. Ньюфаундленд наблюдаются максимальные для Северной Атлантики значения α (>0.85). Из общих закономерностей пространственного распределения следует отметить наличие повышенных значений параметра автомодельности в циклонических макроциркуляционных системах и пониженных - в антициклонических. С широтой параметр α в целом увеличивается, при этом среднеширотный абсолютный минимум отмечается в зоне 15-25° с.ш. ($\alpha = 0.54$), а максимум - между 55 и 60° с.ш. ($\alpha = 0.78$).

Поле α испытывает существенные трансформации от месяца к месяцу, хотя особенности среднегодовой картины в целом сохраняются. Особенно это заметно зимой и весной, причем не только в умеренных и высоких широтах, где конвекция приводит к периодическому разрушению СТ, но и в экваториально-тропическом районе. Наибольшая преобладанность и в какой-то степени стабильность полей α наблюдается летом и осенью (июль-октябрь), когда сезонный термоклин хорошо развит на всей исследуемой акватории.

Характеристикой сезонной изменчивости параметра автомодельности является его среднегодовое стандартное отклонение. На большей части акватории оно не превышает 0.10, а вариация колеблется в пределах 10-16%. Максимальные значения стандартного отклонения наблюдаются в районе субарктического фронта ($\sigma_{\alpha} = 0.12-0.17$), в экваториальной зоне, в районе западного Пиринейского полуострова и в южной части Норвежского моря ($0.10 < \sigma_{\alpha} < 0.12$). Область минимума, так же как и минимума среднего значения α приурочена к западной части тропической зоны ($\sigma_{\alpha} < 0.06$). В периоды образования и разрушения СТ стандартное отклонение в целом выше, чем в период его устойчивого существования.

Проведенный анализ показывает, что параметр автомодельности испытывает существенную изменчивость как во времени, так и по пространству. В связи с этим возникает вопрос о справедливости гипотезы автомодельности применительно к сезонному термоклину Северной Атлантики. Хорошо известно, что автомодельность свидетельствует о некоторой стабилизации процесса, а ее

степень определяется степенью постоянства параметра α . К сожалению, ни в одной пятиградусной трапеции исследуемой акватории параметр автомодельности не является постоянной величиной, а напротив изменяется в течение года в довольно широких пределах, сопоставимых с пространственным изменением α . Отсюда следует вывод, что подобие безразмерных профилей температуры в СТ не сохраняется в течение всего года, т.е. в реальных условиях гипотеза автомодельности не выполнима в том абсолютном, теоретическом смысле, который вкладывает в него Китайгородский и Миропольский (1970). В то же время анализ показывает, что на графиках годового хода всегда можно выделить периоды, когда α практически неизменно или, по крайней мере, меняется незначительно. Таким образом гипотеза автомодельности, будучи невыполнимой в течение всего года, может выполняться в отдельные периоды или сезоны. В данной работе выделены периоды, когда параметр α квазипостоянен, и в соответствии с этим выполнено районирование исследуемой акватории. Сезонный термоклим наиболее близок к автомодельному режиму в период его устойчивого существования и частично в период разрушения. В экваториально-тропическом районе наблюдаются два периода автомодельности общей продолжительностью 6-9 месяцев. Севернее 30-40° с.ш. период автомодельности колеблется от 2-х до 5-ти месяцев.

В заключительном разделе третьей главы обсуждаются вопросы статистической взаимосвязи между отдельными характеристиками СТ. Показано, что связь между температурами на верхней и нижней границах СТ практически отсутствует; коэффициенты корреляции на большей части акватории существенно меньше 0.50, а во многих районах близки к нулю. Это свидетельствует, в частности, о правильности выбора нижней границы СТ, как границы, где сезонные колебания температуры воды, связанные с влиянием радиационных и атмосферных факторов, пренебрежимо малы. Обнаружена тесная статистическая связь между h и T_h , h и Z_D , α и Z_D . На большей части акватории абсолютные значения коэффициентов корреляции для упомянутых пар характеристик находятся в пределах 0.60-0.90. Это имеет важное практическое значение, поскольку позволяет по одному из перечисленных параметров восстанавливать в первом приближении термическую структуру всего ДСО.

В четвертой главе рассматриваются поля теплозапасов ДСО, ВКС и СТ. Теплозапас является наиболее показательной тепловой

характеристикой океана, изучению которой посвящено значительное число работ. Однако, в большинстве подобного рода исследований приводятся значения теплозапаса стандартных слоев океана, что недостаточно обосновано с физической точки зрения и ограничивает применение этой информации для решения ряда задач взаимодействия океана и атмосферы. В настоящей работе впервые получены и исследованы поля теплозапасов генетически самостоятельных структурных зон Северной Атлантики (ДСО, ВКС, СТ), изучены особенности их пространственно-временной изменчивости.

Значения теплозапаса (Q) вычислялись по единичным профилям температуры и осреднялись затем по пятиградусным трапециям для каждого многолетнего месяца и года в целом.

Теплозапас деятельного слоя изменяется по пространству от 2 до 24 Гдж/м², оставаясь выше в субтропическом антициклоне и ниже - в циклонических системах (тропической, субарктической). Это вполне объяснимо, поскольку опускание теплых поверхностных вод в антициклонах обуславливает увеличение мощности ДСО и его средней температуры; в циклонах - напротив, подъем холодных глубинных вод понижает температуру ДСО и уменьшает его мощность. Отличительной особенностью многолетних месячных полей $Q_{ДСО}$ является достаточно высокая стабильность их рисунка, отражающего основные закономерности крупномасштабной циркуляции. На фоне относительно небольшой сезонной изменчивости теплозапаса ДСО ($6Q_{ДСО} \approx 2$ Гдж/м²), характерной для большей части Северной Атлантики, выделяются очаги повышенных значений $6Q_{ДСО}$ (3.0-5.9 Гдж/м²) в районах Большой Ньюфаундлендской банки, Бермудской, Норвежской, Ньюфаундлендской ЭАЗО.

Теплозапас сезонного термоклима изменяется по акватории от 2 до 18 Гдж/м². Области антициклонических круговоротов характеризуются повышенными, а циклонических - пониженными значениями $Q_{СТ}$. Поле теплозапаса СТ весьма устойчиво с июля по октябрь, т.е. в период устойчивого существования термоклима, а наиболее заметная трансформация отмечается в переходные периоды - от весны к лету и от осени к зиме. В целом поле $Q_{СТ}$ достаточно отчетливо отражает влияние, как крупномасштабной трехмерной циркуляции, так и процессов взаимодействия океана и атмосферы. Области минимальных (1-2 Гдж/м²) и максимальных (8.0-9.6 Гдж/м²) значений стандартного отклонения совпадают с областями соответствующих экстремумов среднего значения теплоза-

паса, причем максимумы Q_{CT} , как правило, наблюдаются в ЭАЭО. Показано, что величина $max Q_{CT}$ может использоваться в качестве достаточно надежного критерия для выделения энергоактивных зон. По этому критерию идентифицируется большинство ЭАЭО Северной Атлантики, а также области преобладающей аккумуляции тепла океаном (экваториальная область, Аворско-Канарский район, Б. Ньюфаундлендская банка). Однако, в отдельные месяцы и в отдельных районах более показательными критериями могут служить стандартные отклонения теплозапасов ВКС и ДСО, поэтому для определения энергоактивности района целесообразно исследовать и сопоставлять теплозапасы всех трех структурных слоев - СТ, ВКС и ДСО.

Показано, что сезонный термоклин является самым изменчивым слоем океана в сезонном масштабе времени. Стандартное отклонение теплозапаса СТ в среднем в 1.3 раза больше стандартного отклонения теплозапаса ВКС и в 2.6 раза больше стандартного отклонения теплозапаса ДСО.

В работе рассчитаны и изучены интегральные по площади характеристики теплозапасов СТ, ВКС и ДСО для семи ЭАЭО Северной Атлантики - Норвежской, Исландской, Ньюфаундлендской, Бермудской восточной и западной, Тропической восточной и западной (по классификации Бирмана, Поздняковой, 1985).

Сезонный термоклин по сравнению с верхним квазиоднородным слоем вносит преобладающий вклад в формирование теплозапаса деятельного слоя океана. Отношение $Q_{CT} / Q_{ДСО}$ на большей части акватории колеблется в пределах 60-70% и лишь на северо-западе и у берегов Европы опускается ниже 50%; среднее значение для Северной Атлантики - 57%. Максимальный вклад теплозапаса СТ в теплозапас ДСО (80-90%) наблюдается практически на всей акватории в период устойчивого существования термоклина, а минимальный (10-15%) приходится на периоды образования и разрушения СТ, которые характерны для умеренных и высоких широт. Из семи энергоактивных зон Северной Атлантики лишь в одной - Норвежской ЭАЭО - роль ВКС в формировании теплозапаса ДСО более значима, чем роль сезонного термоклина.

Приложение состоит из семи частей и содержит 176 карт, характеризующих СТ Северной Атлантики в климатическом аспекте.

В заключении сформулированы основные выводы работы.

1. Сезонный термоклин является важнейшим элементом вертикальной термической структуры океана и всей климатической сис-

темы в целом. Совместно с ВКС он запасает энергию взаимодействия океана и атмосферы, которая высвобождаясь в последствии оказывает существенное влияние на формирование погодных условий и короткопериодные колебания климата. Знание "климата" сезонного термоклина позволяет усовершенствовать большинство моделей термоструктуры ДСО, выполнять климатический мониторинг верхних слоев океана, параметризовать СТ в моделях крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы.

2. Предложена комплексная методика автоматизированного определения всех важнейших характеристик СТ по единичному профилю температуры. Отличительной особенностью методики является возможность расчета погрешностей определения характеристик СТ, что позволяет планировать вычисления с заданной точностью, производить фильтрацию исходных данных в соответствии с условиями задачи и тем самым добиваться оптимальных результатов.

3. На основе предложенной методики впервые выполнен комплексный климатолого-статистический анализ сезонного термоклина Северной Атлантики. Построены и исследованы поля средних значений и стандартных отклонений глубины залегания верхней и нижней границ СТ, температуры на этих границах, максимального градиента температуры и глубины его залегания, параметра автотомельности, толщины сезонного термоклина, разности температур поверхность-верхняя граница. Результаты исследования легли в основу Атласа сезонного термоклина, который является первым климатологическим обобщением такого рода. Получены следующие основные выводы:

а) по характеру эволюции СТ акватория делится на две части границей, проходящей в районе 30-40° с.ш. и в целом совпадающей с нулевой изолинией годового бюджета тепла поверхности океана. Севернее этой границы термоклин испытывает значительную сезонную изменчивость, а его генезис характеризуется периодами образования, устойчивого существования, разрушения и отсутствия СТ. Образование термоклина происходит более скоротечно и охватывает в единицу времени в два с лишним раза большую акваторию по сравнению с процессом его разрушения. Южнее параллели 30-40° с.ш. термоклин устойчиво существует в течение всего года и отличается гораздо меньшей изменчивостью его элементов;

б) если изменчивость характеристик верхней границы в большей степени зависит от интенсивности теплового и динамического

взаимодействия океана и атмосферы, то на изменчивость характеристик ядра и нижней границы СТ заметное влияние оказывают циркуляционные факторы;

в) в реальных условиях в сезонном масштабе времени гипотеза об автомодельности профиля температуры в СТ не выполнима в том абсолютном, теоретическом смысле, который вкладывают в нее авторы. Параметр автомодельности меняется в широких пределах как по пространству, так и во времени. Сезонный термоклин наиболее близок к автомодельному режиму в период его устойчивого существования и частично в период разрушения. В экваториально-тропическом районе наблюдаются два периода автомодельности общей продолжительностью 6-9 месяцев. В умеренных и высоких широтах период автомодельности колеблется от 2-х до 5-ти месяцев.

г) обнаружена тесная статистическая связь между глубиной залегания верхней границы и температурой на ней, глубинами залегания максимального градиента и верхней границы, параметром автомодельности и глубиной залегания максимального градиента. На большей части акватории коэффициенты корреляции для упомянутых пар характеристик колеблются в пределах 0.60-0.90.

4. Впервые получены и исследованы многолетние поля средних значений и стандартных отклонений теплозапасов таких структурных зон океана, как ДСО, ВКС, СТ. Теплозапасы этих зон в отличие от теплозапасов традиционных стандартных слоев, являются более наглядными и физически более обоснованными характеристиками теплового режима океана. Получены следующие основные закономерности:

а) области антициклонических макроциркуляционных систем характеризуются повышенными, а циклонических - пониженными значениями теплозапасов СТ и ДСО;

б) сезонный термоклин является самым изменчивым структурным слоем океана в сезонном масштабе времени. Стандартное отклонение теплозапаса СТ по сравнению с аналогичными характеристиками ВКС и ДСО больше соответственно в 1.3 и 2.6 раза;

в) сезонный термоклин по сравнению с ВКС вносит преобладающий вклад в величину теплозапаса ДСО. Отношение $Q_{СТ} / Q_{ДСО}$ на большей части акватории колеблется в пределах 60-70% и лишь на северо-западе и у берегов Европы опускается ниже 50%;

г) стандартное отклонение теплозапаса СТ является достаточно надежным критерием для выделения энергоактивных зон оке-

ана. По этому критерию можно идентифицировать большинство ЭАЗО Северной Атлантики, а также области преобладающей аккумуляции тепла океаном.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гемш Ю.В. Моделирование вертикальной термической структуры деятельного слоя океана (интегральные модели). Обзор. Серия Океанология. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1983. Вып.2.52 с.

2. Гемш Ю.В. Об одном методе восстановления вертикального профиля температуры в деятельном слое океана // Тез. докл. Всесоюзное совещание пользователей океанографической информации. Обнинск, 1985. С.73-74.

3. Гемш Ю.В. Метод определения параметра автомодельности сезонного термоклина // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 1988. Вып.144. С.26-33.

4. Гемш Ю.В. Сезонный термоклин Северной Атлантики. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1987. 252 с. (Деп. в ИЦ ВНИИГМИ-МЦД 11.10.89, №940-гм89).

5. Гемш Ю.В. Теплозапас деятельного слоя, верхнего квазиоднородного слоя и сезонного термоклина Северной Атлантики. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1987. 86 с. (Деп. в ИЦ ВНИИГМИ-МЦД 11.10.89 №941-гм89).

6. Гемш Ю.В. Формирование и изменчивость сезонного термоклина северной части Атлантического океана // Тез. докл. Всес. совещания "Актуальные проблемы развития океанографической информации". Обнинск, 1989. С.184-186.

7. Гемш Ю.В. Особенности теплового режима деятельного слоя, верхнего квазиоднородного слоя и сезонного термоклина Северной Атлантики // Тез. докл. Всес. совещания "Актуальные проблемы развития океанографической информации". Обнинск, 1989. С.188-189.

8. Гемш Ю.В. Сравнительная характеристика деятельного слоя и сезонного термоклина энергоактивных зон Северной Атлантики // Тез. докл. Всес. совещания "Актуальные проблемы развития океанографической информации". Обнинск, 1989. С.186-187.

Ю. Гемш