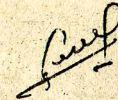


ОДЕССКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Тумани Камара



УДК - 551.465

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ДЕЯТЕЛЬНОГО
СЛОЯ ТРОПИЧЕСКОЙ АТЛАНТИКИ
И ЕГО СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

Специальность 11.00.08 - океанология

Автореферат
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Одесса 1992

Работа выполнена в Одесском гидрометеорологическом институте

Научный руководитель - доктор географических наук, профессор
Сухова В.Ф.

Официальные оппоненты - доктор географических наук,
Полонский А.Б. (МТИ АНУ)
кандидат географических наук,
Шинкевич Н.Г. (УкрНЦЭМ)

Будущая организация: Государственный океанографический институт.

Защита состоится " 23 " июня 1992 года в " 14 " часов
на заседании специализированного совета К 068.04.01 в
Одесском гидрометеорологическом институте по адресу:

270016, г. Одесса, ул. Дзюбская, 15

0231

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского
гидрометеорологического института

Автор

Ученый
специалист
кандидат наук

ода

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Изучение процессов, протекающих в тропической зоне Мирового океана, представляет собой одну из важнейших задач геофизики. С одной стороны, это обусловлено существенным влиянием тропической зоны океана на общую циркуляцию атмосферы и самого океана, так как именно в тропической зоне вода получает наибольшее количество тепла, переносимого затем в высокие широты. С другой стороны, тропическая зона характеризуется очень сложной динамикой вод, наличием противоположно направленных течений, пересекающих океан от одного берега до другого, что приводит к большой неоднородности теплового состояния верхнего деятельного слоя этого региона. В связи с этим в 1979 г. была принята Всемирная исследовательская климатическая программа (ВИКП). Для выполнения конкретных целей этой программы разработаны и выполняются проекты ТОГА (Тропический океан. Глобальная атмосфера), ВОСИ (Эксперимент по изучению циркуляции Мирового океана), СИКВАЛ (сезонный эксперимент в Экваториальной Атлантике), ФОКАЛ (Океан и климат. Экваториальная Атлантика), "Разрезы". Задачи этих проектов - изучение процессов переноса тепла в океане, тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой как основных факторов, определяющих энергетический баланс планеты и связанные с ним колебания глобальных и региональных погодных условий.

Из расчетов многих специалистов следует, что изменчивость в притоке тепла в тропических зонах Атлантического океана через несколько месяцев будет оказывать влияние на температуру воздуха в Западной Африке и всей европейской части Евразийского континента. По этой причине изучение сезонной изменчивости и аномалий теплового состояния Тропической Атлантики является одной из главных задач как упомянутых международных программ, так и советской программы "Разрезы", что свидетельствует об актуальности темы предлагаемой диссертации.

Выше упоминалось, что термодинамическое состояние тропической зоны Атлантического океана очень неоднородно, а широтный разрыв между 20° с.ш. и 20° ю.ш. огромна. Поэтому особый интерес представляет исследование пространственного распределения различных компонентов теплового баланса верхнего деятельного слоя

№
Библиотека

вод, выделение областей в этой огромной акватории, характерных наиболее интенсивным поступлением тепла к океану, областей переноса тепла в океане и областей, которым свойственен наибольший теплооборот за год, т.е. наиболее активных областей. При невозможности осуществлять мониторинг всей тропической зоны, целесообразно в дальнейшем производить наиболее частые наблюдения именно в таких областях.

Цель работы. В связи со всем изложенным выше в настоящей работе были поставлены следующие основные задачи.

1. Детальное исследование пространственного распределения всех компонентов теплового баланса верхнего деятельного слоя Тропической Атлантики.

2. Изучение закономерностей годового хода этих компонентов по всей акватории тропической зоны Атлантического океана.

3. Выделение областей с наибольшим годовым теплооборотом деятельного слоя.

4. Оценка возможных междугодичных колебаний компонентов теплового баланса деятельного слоя Тропической Атлантики.

Решение этих задач осуществлялось на основе современных методов расчета компонентов внешнего теплового баланса. Кроме того, выполнены расчеты полного теплового баланса верхнего наиболее активного слоя океана по изменениям его тепло-содержания за фиксированные интервалы времени. Адвекция тепла определялась двумя способами: как разность между полным и внешним балансами и по заданным полям течений и горизонтальных градиентов температуры воды в верхнем слое. Расчеты компонентов внешнего теплового баланса производились по гидрометеорологическим параметрам, определяемым по наземным наблюдениям и спутниковым измерениям уходящей длинноволновой радиации.

Для определения теплоемкости деятельного слоя использованы все доступные глубоководные наблюдения за температурой воды в Тропической Атлантике между 20° с.ш. и 20° ю.ш.

Научная новизна. Новые результаты, полученные автором и составляющие предмет защиты, следующие:

- построены средние месячные карты всех компонентов теплового баланса верхнего деятельного слоя Тропической Атлантики: радиационного баланса, теплообмена с атмосферой, полного теплового баланса деятельного слоя и адвекции тепла в этом слое;

- установлены основные закономерности сезонной изменчивости всех компонентов теплового баланса деятельного слоя океана, определены количественные характеристики этой изменчивости;

- получено пространственное распределение полного годового теплооборота деятельного слоя и оценена роль каждой составляющей в этом теплообороте;

- определены особые энергоактивные области Тропической Атлантики, в которых теплооборот в 4-5 раз превышает его среднее по акватории значение.

Практическая значимость. Полученные результаты можно использовать для рационального планирования экспедиционных работ и организации мониторинга теплового состояния вод в Тропической Атлантике, для разработки климатических моделей и проверки численных моделей, воспроизводящих закономерности изменений теплового баланса деятельного слоя.

Достоверность полученных результатов подтверждается тем, что средние месячные значения радиационного баланса, вычисленные по наземным гидрометеорологическим наблюдениям, достаточно удовлетворительно соответствуют аналогичным значениям, полученным по спутниковым измерениям УДР. Разность между значениями радиационного баланса, рассчитанного этими двумя способами, для большинства узлов сетки составляет 2-6%, а наибольшие значения разности не превышают 10-12% от средних месячных значений соответствующих месяцев. Адвекция тепла в деятельном слое океана, определяемая по изменениям теплоемкости этого слоя и внешнему бюджету тепла, также соответствует по порядку величин и пространственному распределению адвекции, оцениваемой на основе поля течений.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на семинарах и итоговых конференциях кафедры океанологии ОГМИ, расширенном семинаре, проведенном совместно кафедрой океанологии и Одесским отделением ГОИН-а.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем работы составляет 170 страниц, включая 53 рисунка. Список использованных источников содержит 127 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертации и сформулированы ее основные задачи и полученные в соответствии с этими задачами новые результаты, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается состояние вопроса об исследовании термических процессов Тропической Атлантики. Приведен краткий обзор экспедиционных исследований, направленных на изучение и уточнение особенностей распределения температуры воды и циркуляции в этом регионе. Приведены основные результаты этих исследований - описана схема течений верхнего слоя тропической зоны Атлантического океана, как она представляется в настоящее время по измерениям в океане, расчетам по заданным полям плотности, теоретическим моделям. Приведены известные характеристики течений и противотечений: районы их возникновения, протяженность, ширина, развитие в глубину, скорость в верхнем слое, сезонные изменения.

Показаны основные черты пространственного распределения температуры воды. Описаны результаты теплбалансовых исследований в Тропической Атлантике на основе изданных Атласов теплового баланса Мирового океана и значительного числа статей, опубликованных в последние годы по изучению внутриводной адвекции тепла. В результате такого обзора показана необходимость дальнейшего изучения таких вопросов как сезонная изменчивость всех компонентов теплового баланса деятельного слоя Тропической Атлантики, детальное распределение величин этих компонентов по акватории в каждом месяце года, адвекция тепла в деятельном слое в различных регионах и ее сезонная изменчивость, выделение энергоактивных областей с особо большим годовым теплооборотом. Автором не ставилась цель определить все задачи, которые предстоит решать в будущем при изучении тепловых процессов Тропической Атлантики, а названы лишь те из них, которые исследованы в той или иной мере в данной работе.

Во второй главе приведены результаты расчетов составляющих внешнего теплового баланса Тропической Атлантики. В связи с тем, что судовых актинометрических наблюдений в океане слишком мало (это эпизодические измерения по маршрутам экспедиционных судов и на гидрологических станциях) для того, чтобы

на их основе можно было построить климатические карты радиационного баланса тропической зоны, для такой цели можно использовать два других пути. Один из них основан на эмпирических соотношениях, в которых потоки радиации выражены через метеорологические параметры: температуру и влажность воздуха, облачность, температуру поверхности воды, которые вычислены по многолетним попутным судовым наблюдениям и приводятся в Атласах океанов. Для получения детальных данных о радиационном балансе перспективнее второй путь - по измеряемой со спутников Земли уходящей в космос коротковолновой (УКР) и длинноволновой радиации (УДР). В настоящей работе для изучения радиационного баланса Тропической Атлантики использованы оба этих пути.

Расчеты компонентов радиационного баланса выполнялись на основе гидрометеорологических параметров в узлах сетки $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ от 20° с.ш. до 20° ю.ш. по формулам, предложенным в Морском гидрофизическом институте Н.А.Тимофеевым. Эти формулы учитывают особенности атмосферы над океаном. Многократная проверка этих формул показала, что рассчитанные по ним величины достаточно хорошо соответствуют измеренным значениям. Среднее квадратическое отклонение при использовании общей и нижней облачности не превышает 3% от измеренной величины. Использование же только общей облачности увеличивает среднее квадратическое отклонение до 10%. К сожалению, в климатических расчетах приходится использовать только значения общей облачности, так как сведений о нижней облачности в современных Атласах океанов, из которых выбирались значения гидрометеорологических параметров, не приводится.

Для получения значений радиационного баланса вторым способом использовались опубликованные значения УДР с июня 1974 по февраль 1978 гг. по измерениям сканирующих радиометров, установленных на борту спутников NOAA. Расчеты производились по "схеме перехода", разработанной Н.А.Тимофеевым, который показал однозначность определения поглощенной солнечной радиации и радиационного баланса поверхности океана по значениям УДР.

Годовые значения радиационного баланса, вычисленные по наземным гидрометеорологическим данным и спутниковым наблюдениям, оказались одинаковыми. Максимальные за год значения наблюдаются около 5° ю.ш., где они несколько превышают 6000 МДж/м^2 , к

к 20°с. и ю.ш. годовые суммы уменьшаются до 550 МДж/м^2 . Сезонные значения, вычисленные тем и другим способом, несколько различаются между собой, однако разница для большинства узлов сетки составляет 2–6 %, наибольшие расхождения достигают 10–12 % от средних месячных значений. В дальнейшем для получения величин внешнего теплового баланса использовались значения радиационного баланса, вычисленные по гидрометеорологическим наблюдениям, так как и другие компоненты теплового баланса определены на основе данных, заимствованных из тех же Атласов, следовательно, при одном и том же периоде осреднения. Значения же радиационного баланса, полученные по спутниковым данным, полезны для подтверждения надежности вычисленных величин и для оценки междугодичной изменчивости радиационного баланса.

Ежемесячные (климатические) значения радиационного баланса позволяют оценить характер и величину годовых колебаний. Наибольший размах этих колебаний в пределах рассматриваемой акватории наблюдается около 20°с.ш. и 20°ю.ш. , при этом амплитуда годовой волны здесь составляет 140–190, а полугодовой – только 20–30 $\text{МДж/м}^2\cdot\text{мес.}$ От этих широт в сторону экватора амплитуда годовой волны убывает на 10°с.ш. до 60, а на 10°ю.ш. до 100 $\text{МДж/м}^2\cdot\text{мес.}$ Амплитуда полугодовой волны составляет не более 40 $\text{МДж/м}^2\cdot\text{мес.}$ Вблизи экватора колебания радиационного баланса имеют вид почти правильной полугодовой волны с амплитудой 40–50 $\text{МДж/м}^2\cdot\text{мес.}$

Расчеты радиационного баланса за отдельные годы по спутниковым данным показали, что в Тропической Атлантике могут наблюдаться значительные междугодичные его изменения. Разность между средними месячными значениями в конкретные годы и средними многолетними значениями для соответствующих месяцев может достигать 20–40 и даже 50 % от средней многолетней величины.

Потоки явного и скрытого тепла от океана в атмосферу определялись также на основе полуэмпирической методики, используемой в Морском гидрофизическом институте АН Украины Тимофеевым. Результаты расчетов, выполненные в узлах той же сетки, что и радиационный баланс, показывают, что потери тепла океаном в атмосферу происходят очень неравномерно как по акватории рассматриваемого региона, так и внутри года. В зимний сезон соответствующего полушария формируются области наиболее интенсивной теплоотдачи около 10°с.ш. и 10°ю.ш. , где ее значения превышают

600 $\text{МДж/м}^2\cdot\text{мес.}$ Летом теплоотдача в этих областях ослабевает. Между этими областями в экваториальной зоне отдача тепла остается пониженной в течение всего года. Низкой теплоотдачей, уменьшающейся до нуля поздней весной и в начале лета соответствующего полушария, характерны юго-восточный и северо-восточный регионы Тропической Атлантики, где в этот период температура воды в результате апвеллинга становится ниже температуры воздуха.

Большая изменчивость теплообмена океана с атмосферой по площади приводит к тому, что Тропическая Атлантика не представляет собой однородной области с положительным годовым балансом тепла. Значительные положительные годовые величины наблюдаются только в центре экваториальной полосы (более 2500 МДж/м^2) и, в особенности, в северо-восточной и юго-восточной частях зоны, где они достигают 3500, в прибрежных районах – 4500 МДж/м^2 . По обе стороны экватора находятся обширные районы, в центрах которых, расположенных около 10°с.ш. и 10°ю.ш. годовой внешний баланс тепла близок к нулю, т.е. в этих районах приток тепла от Солнца почти полностью компенсируется его отдачей в атмосферу.

Величина сезонных колебаний внешнего теплового баланса сильно различается в разных районах Тропической Атлантики. Распределение по акватории этой величины не имеет широтной закономерности. Несмотря на сложный годовой ход внешнего баланса тепла, его можно представить двумя главными гармониками – с годовым и полугодовым периодами, которые воспроизводят более 90% дисперсии, оцениваемой по месячным значениям. Севернее 10°с.ш. и южнее 10°ю.ш. амплитуда годовой волны существенно превышает амплитуду полугодовой волны и составляет 150–250 $\text{МДж/м}^2\cdot\text{мес.}$ Между 10°с.ш. и 10°ю.ш. амплитуда годовой волны резко уменьшается, в полосе между экватором и $5\text{--}6^{\circ}\text{с.ш.}$ она менее 50 $\text{МДж/м}^2\cdot\text{мес.}$ в середине этой полосы годовой волны нет вообще, здесь наблюдаются правильные полугодовые колебания внешнего баланса тепла с амплитудой, достигающей 100–110 $\text{МДж/м}^2\cdot\text{мес.}$

Третья глава диссертации посвящена исследованию полного теплового баланса верхнего деятельного слоя Тропической Атлантики.

Тепловой баланс верхнего наиболее активного слоя океана за отдельные интервалы времени определялся по изменению тепло-содержания этого слоя. Чаще всего в качестве деятельного в океане принимают слой 0–200 м. В настоящей работе расчеты тепло-содержания и теплового баланса также были выполнены для слоя 0–200 м, однако такой выбор представляется слишком формальным. По этой причине в работе параллельно производились расчеты и для верхнего квазиоднородного слоя, ограниченного снизу глубиной залегания максимальных градиентов плотности. Эта глубина, как правило, находится в середине температурного скачка (за исключением узкой восточной прибрежной полосы). Наибольшие градиенты плотности на этой глубине обусловлены не только резким убыванием температуры, но и наличием максимума солености, свойственного распространяющейся в тропической зоне подповерхностной субтропической воде. Кривые вертикального распределения температуры и плотности воды показывают, что в преимущественном большинстве случаев на глубине максимальных градиентов плотности температура воды около 21 °С. Поэтому в качестве нижней границы наиболее активного (квазиоднородного) слоя можно принять изотермическую поверхность 21 °С. На востоке тропической зоны толщина этого слоя составляет 30–40 м (если исключить узкую прибрежную полосу, где она уменьшается до 10 м). В направлении на запад граница квазиоднородного слоя заглубляется и вблизи западной границы океана достигает 150–170 м. Изменяется толщина этого слоя и поперек экватора.

Сезонные изменения в положении поверхности 21 °С невелики, они заметны лишь в самой западной и самой восточной частях Тропической Атлантики, где они превышают 10 % от средней годовой ее глубины. Во всех остальных регионах эти отклонения меньше 10 %, в связи с чем в работе толщина квазиоднородного слоя принималась одинаковой для всех месяцев года и определялась в каждом узле сетки по средней глубине изотермической поверхности 21 °С.

Расчеты тепло-содержания производились по данным глубоководных наблюдений, обработанных в ОИМЛ. В массиве данных, осредненных по квадратам 2,5° x 2,5° вошли наблюдения 1957–1959 гг. по программам МТ и МРС, 1963–65 гг. по программе МСИТА, а также по программам АТЭП (1974 г.) и ПЭП (1979 г.).

Кроме того использовано большое число наблюдений немецкого экспедиционного судна "Александр Гумбольдт" у берегов Северной Африки в 1970–73 гг. и все доступные измерения температуры воды, выполненные судами советской промышленной разведки. Всего для расчета средних значений в узлах сетки (центрах упомянутых квадратов) использовано 14264 станции. Эти станции неравномерно распределены по акватории и месяцам года. Для сглаживания годового хода средние месячные значения температуры получены посредством трехмесячного скользящего осреднения. Вычисленное среднее значение отнесено к 15 числу центрального из трех месяцев.

Значение теплового баланса слоя в каждом квадрате (Б) определялось как следующая разность:

$$B_j = (Q_{j+1} - Q_{j-1}) / 2, \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес.}$$

или

$$B_j = (Q_{j+1} - Q_{j-1}) / n, \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{сутки,}$$

если

n – число суток между серединами $j+1$ и $j-1$ месяцев.

В сумме за год полный тепловой баланс слоя равен нулю, однако в Тропической Атлантике наблюдаются значительные его сезонные изменения, величина которых неодинакова в разных регионах. Широтный эффект в распределении бюджета тепла слоя (как квазиоднородного, так и двухсотметрового) нарушается во всей рассматриваемой зоне, но особенно большие его нарушения наблюдаются севернее экватора. Здесь наряду с обширными регионами, в которых величины бюджета тепла слоя во все месяцы остаются относительно небольшими, имеются области, где эти величины (положительные или отрицательные) достигают 300–400 и даже 500 МДж/м²·мес. Одна из таких областей располагается к западу от 30° з.д., между 2 и 8° с.ш. Отрицательные значения теплового бюджета в этой области формируются в ноябре и существуют до апреля включительно. В мае здесь начинают формироваться положительные значения теплового бюджета, достигающие наибольших величин в июне–августе.

Вторая область больших месячных значений теплового баланса слоя находится вблизи африканского побережья, севернее

12° с.ш. По всей вероятности, основная часть этой области остается севернее рассматриваемой в настоящей работе акватории.

В южной тропической зоне наибольшие месячные величины теплового баланса слоя наблюдаются вблизи южной ее границы. Максимальные положительные значения здесь наблюдаются в декабре - январе, отрицательные - в июне - июле.

Годовой ход теплового баланса слоя хорошо аппроксимируется двумя главными волнами с преобладанием на большей площади годовой волны. Её амплитуда изменяется по акватории Тропической Атлантики от 50 до 250 МДж/м²·мес. Наибольших (200 - 250 МДж/м²·мес) амплитуда главной волны достигает в крайней северо-восточной части, на западе экваториальной зоны и на самом юге рассматриваемой акватории. Амплитуда полугодовой волны в среднем меньше годовой амплитуды. Наибольшие её значения, превышающие 100 МДж/м²·мес, наблюдаются в западной части между 5-6° с.ш. и 8-9° ю.ш. Годовая и полугодовая волны воспроизводят около 90% дисперсии месячных значений теплового баланса.

Полный годовой теплооборот по акватории Тропической Атлантики по своим величинам и распределению не соответствует внешнему теплообороту. Наибольшие величины полного теплооборота слоя наблюдаются между экватором и 7-8° с.ш., 35 и 45° з.д., в центре области они достигают 3500-4000 МДж/м². В направлении на восток в этой полосе теплооборот уменьшается до 500 - 750 МДж/м². Между 8 и 15-17° с.ш. годовой теплооборот незначителен, в центре полосы он составляет всего 150-450 МДж/м². В предыдущей главе было показано, что в этой полосе и внешний тепловой баланс как в целом за год, так и по месяцам, невелик, следовательно приток тепла к слою на этих широтах постоянно и почти полностью компенсируется его отдачей в атмосферу.

Расчет полного теплооборота в слое 0-200 м обнаруживает распределение, аналогичное его распределению в верхнем квазиоднородном слое. Область максимальных значений теплооборота более 3000, а в центре 4000 МДж/м² также расположена между экватором и 7° с.ш. в западной части океана. Величины теплооборота двухсотметрового слоя и в других регионах Тропической Атлантики довольно хорошо совпадают с его величинами для верхнего квазиоднородного слоя. Такие результаты расчетов показывают,

что основной теплооборот происходит в верхнем слое тропической зоны океана, нижней границей которого служит глубина максимальных градиентов плотности.

В четвертой главе приводятся результаты расчетов адвекции тепла, выполненных двумя разными способами. Первый из них состоит в определении разности между полным тепловым балансом слоя и его внешним тепловым балансом. Так как полный тепловой баланс состоит из компонентов внешнего баланса, переноса тепла течениями и потока тепла через нижнюю границу, две последние составляющие вместе можно вычислить следующим образом:

$$T + K = B - B,$$

где

T - горизонтальная адвекция;

K - поток тепла через нижнюю границу слоя;

B - полный баланс слоя;

B - внешний баланс.

Суммарная компонента T + K в дальнейшем называется "внутриводная" адвекция $A = T + K$. Положительные значения A означают приток тепла к слою, отрицательные - отток. Величины A вычислялись для каждого узла и для всех месяцев года в верхнем квазиоднородном слое и в слое 0-200 м.

В среднем за год в Тропической Атлантике преобладает адвективный отток тепла, однако величина этого оттока неодинакова по ее акватории. Наиболее значительные годовые величины оттока тепла наблюдаются в трех областях: в узкой экваториальной полосе (-2500 МДж/м²), в крайних северо-восточной (-3500 МДж/м²) и юго-восточной (-3000 МДж/м²) частях тропической зоны.

На протяжении года адвекция тепла изменяется в больших пределах. В январе-марте в южной тропической зоне наблюдается в основном отток тепла в деятельном слое (отрицательные величины адвекции), хотя абсолютные значения невелики. В экваториальной зоне, главным образом севернее экватора, отрицательные значения увеличиваются с востока на запад от нуля в Гвинейском заливе до -300 МДж/м²·мес. вблизи берегов Америки. Еще одна область с отрицательными значениями адвекции находится в северо-восточной части, вблизи берегов Северной Африки (также до -300 МДж/м²·мес). В апреле распределение адвекции начинает изменяться. В центре южной тропической зоны формируется область

с положительной адвекцией. Отрицательная адвекция возникает в Гвинейском заливе ($-200 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес}$), особенно большие отрицательные значения наблюдаются на западе экваториальной зоны между экватором и $6-7^\circ \text{с.ш.}$ ($-400 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес}$).

В мае происходит существенное изменение адвекции во всей Тропической Атлантике. В западной части экваториальной зоны большие отрицательные значения адвекции смещаются на восток, в Гвинейском заливе они достигают $-300 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес}$. В южной части между 5 и $10-12^\circ \text{ю.ш.}$ через весь океан проходит область положительной адвекции, а на крайнем юге появляются отрицательные значения адвекции. В июне-июле тенденции, появившиеся в мае, усиливаются. В Гвинейском заливе отрицательные значения адвекции составляют $-400 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес}$. В западной части северной экваториальной зоны на месте зимней области отрицательной адвекции формируется область положительной адвекции со значениями $400 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес}$. в ее центре. В северо-восточной части, вблизи берегов Северной Атлантики большие зимние отрицательные значения сменяются относительно слабо выраженной положительной адвекцией. В южной тропической зоне от 3 до 12°ю.ш. адвекция в эти месяцы очень слабая ($-100 \div +100 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес}$); а южнее наблюдается отрицательная адвекция.

В августе-сентябре возникают новые тенденции в изменении адвекции тепла, по-степенно приближающие ее распределение к зимнему по северному полушарию варианту.

Область интенсивной положительной адвекции на западе северной экваториальной зоны начинает ослабевать, в октябре она вовсе исчезает. В сентябре-октябре формируются области с интенсивным оттоком тепла в северо-восточной и юго-восточной частях (до $-400 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес}$). В ноябре вблизи берегов Южной Америки между 2 и $6-7^\circ \text{с.ш.}$ образуется область отрицательной адвекции, которая в декабре достигает почти такого же развития, как и в январе, и вообще распределение адвекции во всей тропической зоне становится близким к январскому.

Таким образом, сезонная изменчивость адвекции тепла значительная, хотя величина колебаний неодинакова в разных регионах. Размах сезонных колебаний достигает наибольших значений на западе северной экваториальной зоны (до $1000 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес}$), в северо-восточной и юго-восточной областях он меньше, но все же достигает $400-500 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес}$. Годовой ход достаточно хорошо ап-

проксимируется годовой и полугодовой волнами. Годовая волна имеет наибольшую амплитуду в экваториальной зоне, которая в западной части превышает $300 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес}$., в восточной около $150 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес}$. В полугодовой волне наиболее значительная амплитуда также наблюдается в экваториальной зоне, но только на западе, где она местами превышает $200 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес}$. На остальной акватории амплитуда полугодовой волны $50-100 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес}$., за исключением северо-восточной области, в которой она более $100 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес}$.

Области положительной и отрицательной адвекции во все сезоны, определяемые отдельно для верхнего квазиоднородного слоя и слоя $0-200 \text{ м}$ полностью совпадают. Абсолютные значения адвекции также находятся в хорошем соответствии. Максимальные положительные и отрицательные значения, достигающие по абсолютной величине $400 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес}$. в обоих слоях находятся в одних и тех же районах. Качественное и количественное соответствие величин адвекции, вычисленной отдельно для указанных слоев показывает, что основной перенос тепла в Тропической Атлантике осуществляется в верхнем слое, ограниченном снизу слоем максимальных градиентов плотности.

Помимо определения внутриводной адвекции тепла в качестве разности между полным и внешним тепловым балансами слоев производилось вычисление горизонтальной адвекции по заданным векторам течения в слое $0-200 \text{ м}$ и горизонтальным градиентам температуры воды. Средние в слое $0-200 \text{ м}$ вектора течений определялись по картам течений, рассчитанным на основе адаптивной модели А.С. Саркисяном и его соавторами. Горизонтальные градиенты температуры воды вычислялись по тем же материалам, что и теплосодержание.

Несмотря на то, что адвекция, оцениваемая по изменению теплосодержания, включает и обмен через нижнюю границу слоя, а вычисляемая по горизонтальным составляющим течений, только горизонтальный перенос в слое, те и другие карты обнаруживают совпадение областей положительной и отрицательной адвекции и одинаковый порядок величин. Хотя конфигурация и протяженность этих областей неодинакова, все же построенные карты позволяют считать, что основной вклад в ту составляющую полного теплового баланса, которая названа "адвекцией", вносит горизонтальный перенос тепла течениями верхнего слоя.

Годовой теплооборот, обусловленный адвекцией тепла в верхнем квазиоднородном слое, и годов. теплооборот в слое 0-200 м оказались одного порядка. Наибольшие значения теплооборота, превышающие 2000 МДж/м^2 , наблюдаются в двух регионах. Один из них расположен в восточной части Тропической Атлантики и проходит вдоль берегов Африки от 10° ю. ш. на север, захватывает Гвинейский залив и далее простирается на север в виде сужающейся полосы за пределы тропической зоны. Второй регион находится в западной части между экватором и $7-8^\circ \text{ с. ш.}$ В его центре значения годового адвективного теплооборота достигают $3000-4000 \text{ МДж/м}^2$.

В заключении диссертации сформулированы выводы, которые сводятся к следующему.

- Величины радиационного баланса, вычисленные двумя способами: по наземным метеорологическим данным и спутниковым измерениям УДР оказались близкими между собой. Максимальная разница ежемесячных значений, определяемых тем и другим способами, составляет 10-12%, однако для большинства узлов сетки она не превышает 6% от средней месячной величины, что свидетельствует о надежности полученных результатов.

- Наибольшие годовые значения радиационного баланса наблюдаются около 5° ю. ш. , где они превышают 6000 МДж/м^2 , к 20° с. ш. и 20° ю. ш. они убывают до 5500 МДж/м^2 ; сезонные изменения на 20° с. ш. и 20° ю. ш. составляют $300-400 \text{ МДж/м}^2$, при этом амплитуда годовой волны равна 140-190, а полугодовой $20-30 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес.}$ В сторону экватора амплитуда годовой волны убывает на 10° с. ш. до 60, а на 10° ю. ш. до $100 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес.}$ полугодовой - увеличивается до $40 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес.}$ Вблизи экватора колебания радиационного баланса имеют вид почти правильной полугодовой волны с амплитудой $40-50 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес.}$

- В радиационном балансе обнаруживаются значительные междугодовые изменения. Разность между средними месячными значениями в конкретные годы и средними многолетними значениями соответствующих месяцев может достигать 20-40 и даже 50% (в некоторых районах) от средней многолетней величины.

- Теплообмен с атмосферой происходит крайне неравномерно как по акватории Тропической Атлантики, так и по месяцам года. В зимний сезон соответствующего полушария формируются зоны ин-

тенсивной теплоотдачи с осевыми линиями примерно по 10° с. ш. и 10° ю. ш. , где величина отдачи тепла в атмосферу превышает $600 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес.}$ Летом теплоотдача в этих областях ослабляется. В экваториальной зоне отдача тепла в течение всего года остается пониженной. Слабым теплообменом, уменьшающимся до нуля поздней весной и в начале лета, характерны северо-восточный и юго-восточный регионы Тропической Атлантики, где в этот период температура воды в результате апвеллинга становится ниже температуры воздуха.

- Тропическая Атлантика не представляет собой однородной области с положительным годовым внешним балансом тепла. Значительные его годовые суммы наблюдаются в центре экваториальной полосы (более 2500 МДж/м^2) и, в особенности, в крайних северо-восточной и юго-восточной частях тропической зоны, где они достигают 3500, а в прибрежных районах 4500 МДж/м^2 . По обе стороны экватора расположены обширные районы с центрами около 10° с. ш. и 10° ю. ш. , в которых годовой внешний бюджет тепла близок к нулю, т.е. в этих районах приток тепла от Солнца почти полностью компенсируется его отдачей в атмосферу.

- Полный тепловой баланс деятельного слоя в сумме за год равен нулю, однако, в Тропической Атлантике наблюдаются значительные его сезонные изменения, величина которых не имеет широтного распределения. Наибольшие сезонные изменения происходят в районе $2-8^\circ \text{ с. ш.}$ и $35-45^\circ \text{ з. д.}$ Размах годовых колебаний здесь достигает $1000 \text{ МДж/м}^2 \cdot \text{мес.}$, а полный годового теплооборота в центре области - $3500-4000 \text{ МДж/м}^2$, что в 4-5 раз превышает его среднее по площади значение и в 10 раз наименьшие значения между 8 и 14° с. ш.

В южной тропической зоне столь большой неоднородности в распределении годового теплооборота не наблюдается.

- Ежемесячные величины полного теплового баланса квазиоднородного и двухсотметрового слоев находятся не только в качественном, но и в количественном соответствии, что хорошо подтверждается и картами годового теплооборота обоих слоев. Это позволяет считать, что основной теплооборот осуществляется в верхнем слое океана, ограниченном снизу глубиной максимальных градиентов плотности.

- Годовой ход теплового баланса верхнего слоя Тропической Атлантики хорошо аппроксимируется двумя главными волнами - годово-

го и полугодового периодов с преобладанием годовой волны. Обе волны воспроизводят около 90% дисперсии месячных значений теплового баланса слоя.

* - Адвекция тепл. в верхнем квазиоднородном слое, вычисленная как разность между полным и внешним балансами тепла, по географическому распределению и величинам в разных регионах удовлетворительно совпадает с адвекцией в слое 0-200 м, вычисленной таким же образом. Следовательно, основной перенос тепла в Тропической Атлантике осуществляется в верхнем квазиоднородном слое.

- Расчет адвекции тепла по заданным горизонтальным составляющим течений и градиентам температуры воды показал ее совпадение в распределении по акватории Тропической Атлантики областей положительной и отрицательной адвекции и в порядке величин с результатами вычислений разности между полным и внешним балансами тепла. В связи с тем, что указанная разность включает не только горизонтальную адвекцию, но и обмен через нижнюю границу слоя, можно считать, что горизонтальный перенос тепла течениями в верхнем слое играет главную роль среди других факторов, входящих в понятие "внутриводная адвекция".

- В среднем за год в Тропической Атлантике преобладает адвективный отток тепла. Наиболее значительные годовые величины оттока тепла наблюдаются в трех областях: в узкой экваториальной полосе (-2500 МДж/м^2), в крайних северо-восточной (-3500 МДж/м^2) и юго-восточной (-3000 МДж/м^2) частях тропической зоны.

- В течение года адвекция тепла изменяется в больших пределах. Размах сезонных колебаний, как и годовой теплооборот, обусловленный адвекцией, неодинаковы по акватории Тропической Атлантики. Наибольшие значения адвективного теплооборота, превышающие 2000 МДж/м^2 , наблюдаются в двух регионах. Один из них проходит вдоль берегов Африки от 10° ю.ш. на север, охватывает Гвинейский залив и простирается далее на север в виде узкой полосы за пределы тропической зоны. Второй регион находится в западной части между экватором и $7-8^\circ \text{ с.ш.}$ В его центре значения годового адвективного теплооборота достигают $3000 - 4000 \text{ МДж/м}^2$.

- По среднемесячным величинам теплового баланса, адвекции тепла, а также полного годового теплооборота деятельного слоя в Тропической Атлантике можно выделить три энергетически активные области, которые расположены в западной части северной экваториальной зоны ($2-8^\circ \text{ с.ш.}$), в северо-восточной и юго-восточной частях (у берегов Африки). В этих областях как средние месячные величины теплового баланса, так и полный годовой теплооборот деятельного слоя в 4-6 раз превышают фоновые значения этих величин.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Тумани Камара, Н.А. Тимофеев. Тепловой баланс и энергетически активные зоны Тропической Атлантики. - Севастополь, Морской гидрофизический институт АН УССР, 1988. - 97 с. Деп. ВИНТИ, № 7524 - В88.

2. Тумани Камара. Адвекция тепла течениями в тропической зоне Атлантического океана. - Одесса. Одесский гидрометеорологический институт, 1990. - 9 с. Деп. Укр. НИИТИ, № 1002-2к 90.

3. Тумани Камара, В.Ф. Суховой. Тепловой баланс верхнего квазиоднородного слоя Тропической Атлантики и его сезонная изменчивость. Одесса, Одесский гидрометеорологический институт, 1992. - 24 с. Деп. Укр. НИИТИ, № 286 - Ук 92.