

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ И ФРОНТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

В.В. Украинский\*, Ю.В. Артамонов\*\*,  
Е.А. Скрипалева\*\*

\* Украинский научный центр  
экологии моря

г. Одесса, Французский бульвар, 89

\*\* Морской гидрофизический институт  
НАН Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

E-mail: ocean@mhi2.sebastopol.ua

*В работе анализируются особенности сезонной и межгодовой изменчивости поля температуры поверхности океана в Северной Атлантике по данным спутниковых измерений. Уточнена схема крупномасштабных температурных фронтов. Проанализированы основные закономерности сезонного цикла фронтов в связи с пространственными особенностями изменчивости поля температуры.*

**Введение.** Исследование изменчивости гидрофизических полей на различных пространственно-временных масштабах и оценки ее вклада в общую дисперсию океанических процессов важно при решении задач изменчивости климата. Показано, что в общем случае в среднемесечных климатических полях температуры и солености мезомасштабная, синоптическая и межгодовая изменчивость сглаживаются. Достоверность оценки амплитуды сезонного сигнала достигает 70 – 90% [1, 2]. Однако неравномерное распределение данных наблюдений по акватории океана и во времени делает эти оценки пригодными только для районов с хорошей обеспеченностью наблюдениями. Отличается также качество данных. Этим можно объяснить различия величин трендов температуры воды, приводимых в разных работах. Кроме того, эти оценки проводились на различных пространственно-временных масштабах. Недостаток контактных измерений объясняет тот факт, что до настоящего времени мало работ, рассматривающих особенности пространственно-временной изменчивости гидрологических фронтов и течений в связи с изменчивостью общей термохалинной структуры вод. Гидрологические фронты изучены с разной степенью детализации, а сезонный

цикл для большинства из них не рассматривался. Отдельные попытки исследовать сезонную изменчивость фронтов базируются на уже устаревших гидрологических массивах, причем малая обеспеченность наблюдениями в открытых районах океана, а также относительно слабая интенсивность некоторых фронтов затрудняют исследование их сезонного цикла [3, 4].

В связи с этим, результаты реанализа данных спутниковых наблюдений за температурой поверхности океана (ТПО), которые относительно равномерно покрывают его поверхность и регулярны по времени, представляются более пригодными для таких исследований.

Цель данной работы – описать основные пространственные особенности сезонной и межгодовой изменчивости поля температуры в Северной Атлантике по спутниковым данным. Проанализировать сезонные изменения характеристик фронтов на поверхности океана в связи с изменчивостью поля температуры.

В данной работе рассматривается акватория Атлантического океана между экватором и 40° с.ш.

**Материалы и методика.** В работе используется ряд спутниковых измерений температуры поверхности океана (1985 – 2001 гг.) в узлах 54×54-километровой сетки со среднемесечным осреднением. За интенсивность сезонного цикла ТПО принималось среднеквадратическое отклонение  $СКО_{сез}$ , которое рассчитывалось, как среднее значение  $СКО$  для 17-ти сезонных циклов. Межгодовая изменчивость ( $СКО_{меж}$ ) рассматривалась, как среднее  $СКО$ , рассчитанное для каждого из 12-ти месяцев. В этом случае,  $СКО$  для каждого месяца вычислялось по 17-ти значениям температуры одного месяца по всем годам. В работе было также проанализировано пространственное распределение линейных трендов ТПО, рассчитанных по методике [5].

В данном исследовании рассматривались крупномасштабные фронты с преобладающей зональной протяженностью, поэтому для их анализа были рассчитаны поля меридиональных градиентов температуры (МГТ), осредненные по месяцам за 17 лет. Подробно методика выделения фронтов изложена в работе [6]. Величины экстремумов МГТ (°C/54 км) по тексту статьи приводятся в скобках.

**Основные результаты.** Максимальная сезонная изменчивость ТПО ( $2 - 3^{\circ}\text{C}$ ) наблюдается в субтропиках севернее  $25 - 30^{\circ}$  с.ш. и в области апвеллинга у берегов Северо-Западной Африки. Минимальные величины  $\text{СКО}_{\text{сез}}$  ( $0.5 - 0.6^{\circ}\text{C}$ ) отмечаются несколько севернее экватора (рис. 1). Эта область примерно совпадает с положением термического экватора. Минимум сезонной изменчивости наблюдается также в тропиках западного пограничного слоя ( $1.0^{\circ}\text{C}$ ).

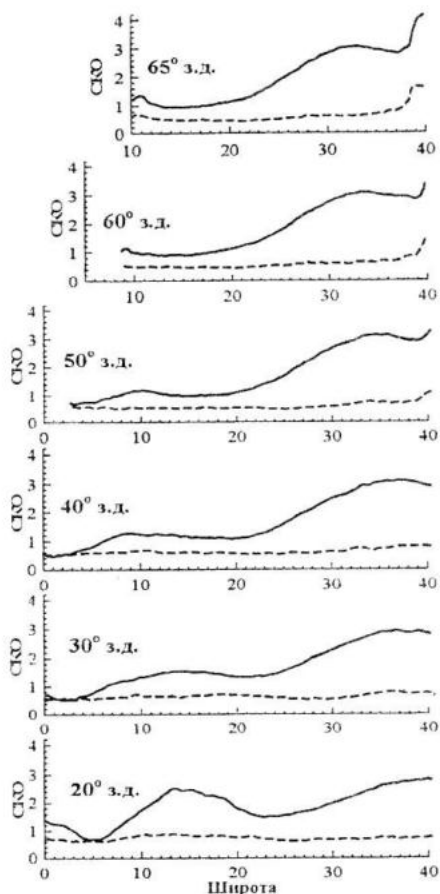


Рисунок 1 – Изменение с широтой  $\text{СКО}_{\text{сез}}$  (сплошная линия) и  $\text{СКО}_{\text{меж}}$  (пунктир) на различных меридианах

Максимальная межгодовая изменчивость поля ТПО отмечается на северо-западе исследуемой области ( $60^{\circ}, 65^{\circ}$  з.д.). Увеличение значений  $\text{СКО}_{\text{меж}}$  наблюдается также у экватора на востоке океана ( $20 - 30^{\circ}$  з.д.), в зоне Течения Ломоносова.

Пространственное распределение отношения сезонной изменчивости к межгодовой ( $\text{СКО}_{\text{сез}}/\text{СКО}_{\text{меж}}$ ) показывает, что в тропической зоне несколько севернее экватора, при общем понижении уровня изменчивости, межгодовые вариации близки к сезон-

ным изменениям, тогда как на большей части исследуемой акватории сезонные вариации ТПО превышают межгодовую изменчивость в 2 – 3 раза (рис. 2).

Максимум значений  $\text{СКО}_{\text{сез}}/\text{СКО}_{\text{меж}}$  (до 3 – 5) наблюдается в зоне апвеллинга у побережья Африки и на северо-западе Северного субтропического антициклонического круговорота (ССАК).

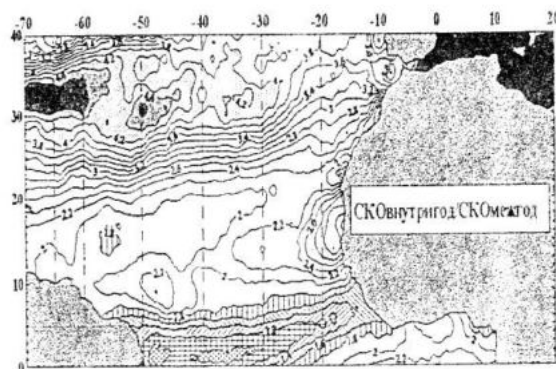


Рисунок 2 – Распределение  $\text{СКО}_{\text{сез}}/\text{СКО}_{\text{меж}}$

Качественно похожая картина наблюдается и в распределении линейных трендов ТПО за 17 лет (рис. 3). Экстремальные значения трендов ТПО (размерность  $^{\circ}\text{C}/17$  лет) отмечаются на северо-западе акватории в зоне Гольфстрима ( $\sim 3 - 3.5$ ) и в области Африканского апвеллинга ( $\sim 2 - 3$ ). В целом в Северном полушарии преобладают положительные тренды ТПО.

Выявлены различия в распределении трендов ТПО для отдельных месяцев года. Отмечается усиление положительных трендов ТПО в области Африканского апвеллинга и в зоне Гольфстрима в начале года.

Отрицательные тренды усиливаются в середине года в центральной части субтропического антициклонического круговорота, у берегов Африки и у экватора. К концу года отрицательные тренды ТПО наблюдаются на западе региона и у входа в Гибралтарский пролив.

Анализ структуры фронтов позволил установить, что на крайнем северо-западе исследуемого региона ( $65^{\circ}$  з.д.) выделяется зона высоких положительных значений МГТ, которая связана с Фронтом Гольфстрима (ФГ). Здесь максимальные значения МГТ (1.65) наблюдаются с января по апрель. Северный субтропический фронт (ССБТФ) отделяется от ФГ экстремумом отрицательных значений МГТ, которые наиболее интенсивны ( $-0.25$ ) в мае.

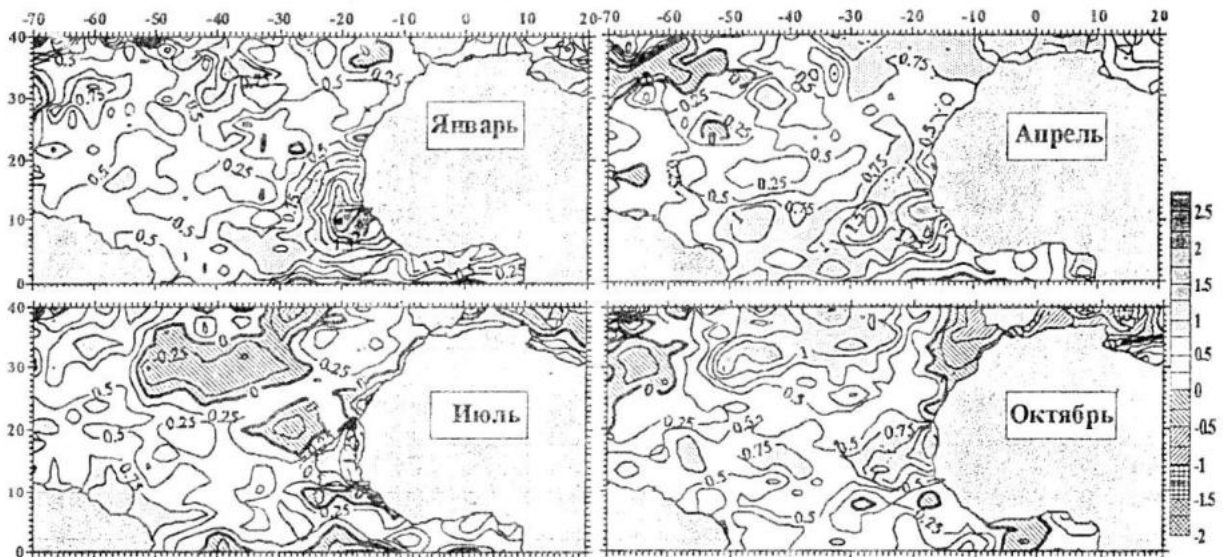


Рисунок 3 – Распределение линейных трендов ТПО в Северной Атлантике в январе, апреле, июле и октябре

ССБТФ характеризуется сложной меридиональной структурой с наличием нескольких (обычно трех) экстремумов с одинаковым сезонным сигналом интенсивности. Фронт усиливается в зимний период, примерно с декабря по март, когда находится в крайнем южном положении. Это фронт наиболее развит в западном секторе океана, где максимальные значения МГТ в период его обострения достигают 0.35.

Северный тропический фронт (СТФ) прослеживается в середине года по экстремуму отрицательных величин МГТ между 15° и 27° с.ш. (рис. 4). Продолжительность поверхностного проявления фронта увеличивается с запада на восток – с июня по сентябрь на 65° з.д. и с марта по октябрь на 30° з.д. Восточный участок фронта у берегов Африки (20° з.д.) существует в течение всего года. На всем своем протяжении СТФ максимально усиливается (МГТ ~ -0.25) в августе, т.е. тогда, когда достигает крайнего северного положения (25 – 27° с.ш.).

Южнее 15 – 20° с.ш. выделяются две ветви Северного субэкваториального фронта: Северная ветвь ССБЭФ между 9° и 19° с.ш. и собственно ССБЭФ между 4° и 10° с.ш. За исключением центральной части океана (30° з.д.), обе ветви смещаются в северном направлении от весны к осени. Размах сезонных колебаний их широтного положения составляет на западе акватории 4 – 5°, на востоке – 7 – 8°. В центральной части океана, на 30° з.д. сезонные вариации по-

ложения ветвей сокращаются до 2° и имеют хорошо выраженный полугодовой сигнал со смещением на север в марте и октябре. СВ ССБЭФ усиливается (МГТ ~ 0.4) в июне-июле, а ССБЭФ – в апреле-мае (МГТ ~ 0.3). На западе акватории (40° з.д.) ССБЭФ максимально обостряется чуть позднее – в июле. Восточное продолжение ССБЭФ – Фронт Гвинейского течения (ФГвТ) наиболее четко проявляется на Гринвичском меридиане с максимумом обострения (0.4) в июле. В марте и октябре фронт отходит от берега Африки, смещаясь к 3 – 4° с.ш.

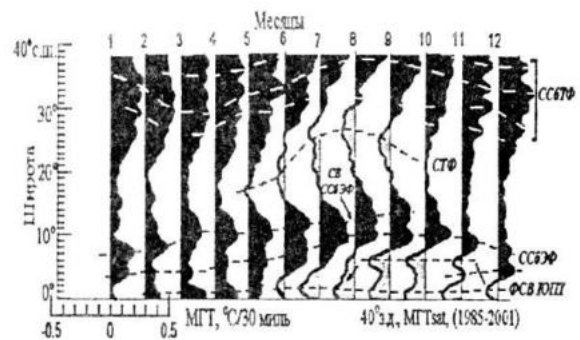


Рисунок 4 – Широтное распределение МГТ для каждого месяца года и положение основных фронтальных разделов вдоль меридиана 40° з.д.

Фронт Северной ветви Южного пассатного течения (ФСВ ЮПТ) прослеживается в виде экстремума отрицательных значений МГТ между 2° ю.ш. и 3° с.ш. Восточнее 30° з.д. он достигает наибольшей интенсивности (МГТ ~ -0.3 – -0.47) в июне-июле и мак-

симально смещается к экватору в марте-апреле. На Гринвиче в сезонных смещениях положения ФСВ ЮПТ, как и ФГвТ, наблюдается полугодовой сигнал. Фронт смещается на юг, пересекая экватор, в марте и октябре. В центральной и западной части океана фронт Северной ветви ЮПТ в начале года не прослеживается. На 30° з.д. ФСВ ЮПТ проявляется с мая по декабрь, а на 40° з.д. — с июня по декабрь. На 40° з.д. в результате влияния поднятия Демерера образуется вторая ветвь ФСВ ЮПТ. Она располагается на 5–6° с.ш. и прослеживается с августа по ноябрь. На 50° з.д. ФСВ ЮПТ продолжается как Фронт Гвианского течения (ФГТ), существующий с августа по декабрь и усиливающийся (МГТ ~ -0.2) в сентябре. В октябре, как и в случае ФСВ ЮПТ, отмечается разделение ФГТ на две ветви. Западнее, на 65° з.д., в Карибском море, в течение года наблюдается Фронт Карибской ветви Гвианского течения (ФКВ ГТ), с максимальным его обострением в феврале (МГТ ~ -0.3).

Результаты проведенного анализа выявили существенные пространственные различия в изменчивости характеристик фронтов на поверхности океана. Наиболее интенсивными фронтами являются СВ ССБЭФ (среднегодовое значение МГТ ~ 0.4) и ФСВ ЮПТ (-0.35), а самым слабым — СТФ (-0.07). Значительные сезонные вариации интенсивности (СКО ~ 0.1) характерны для ССБТФ и ССБЭФ в западной части океана и для ФСВ ЮПТ — на востоке. Максимальные внутригодовые СКО положения фронтов составляют 2–3.5° по широте и отмечаются для ССБТФ, СТФ, ССБЭФ, а также для Северной ветви ССБЭФ (рис. 5). Фронты на северной периферии ССАК усиливаются в зимний период, в тропической зоне — преимущественно летом.

Механизмы, влияющие на формирование фронтов, пока недостаточно ясны. Вместе с тем, совместный анализ внутригодовой изменчивости интенсивности фронтов, поля ветра и внешнего теплового баланса позволил выявить ряд закономерностей. Так, интенсификация ССБЭФ наблюдается в середине года, в период усиления меридиональной неравномерности пассатных ветров в области ВЗК [6]. Для некоторых фронтов хорошо выражено фазовое запаздывание в наступлении максимума обостренности на различных меридианах. Запаз-

дывание годового сигнала на восток для некоторых фронтов возможно связано с аналогичным запаздыванием сезонного сигнала в поле ветра.

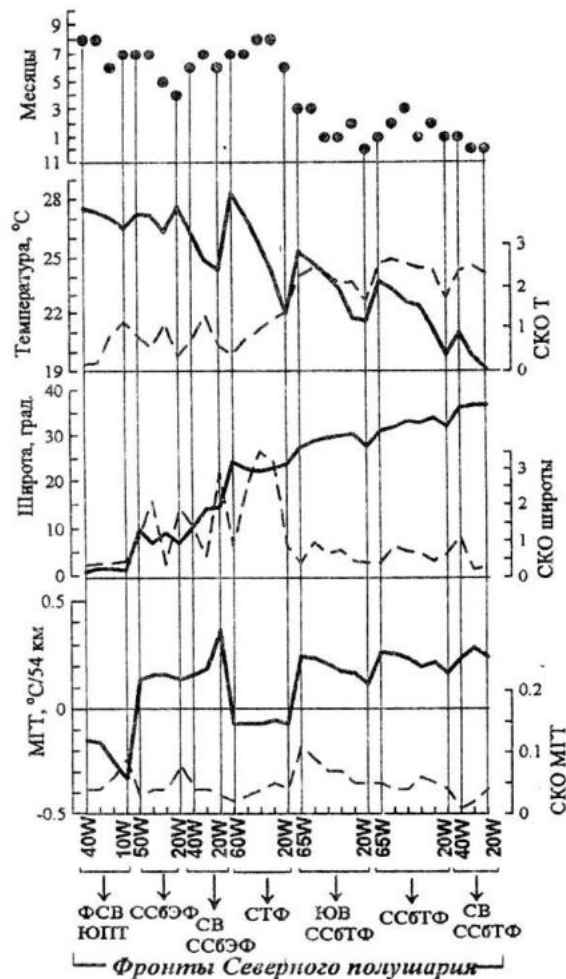


Рисунок 5 — Статистические характеристики фронтов: в направлении сверху вниз — месяц наступления максимума обостренности фронтов (точки); среднегодовая температура, при которой формируется фронт, широта и значения МГТ (сплошные линии); и их внутригодовые СКО (пунктир). На нижней оси указаны аббревиатуры фронтов и меридианы, на которых они рассматриваются

Большинство фронтов изменяется с годовым периодом, который преобладает также в сезонной изменчивости полей ветра и внешнего теплового баланса. Отмечается увеличение вклада полугодовой гармоник в изменчивость фронтов в пограничных слоях у берегов, что связано с усилением полугодовой периодичности в поле прибрежных ветров.

Температура, при которой формируются фронтальные разделы, также как и фронты, изменяется с годовым периодом в соответ-

ствии с сезонными вариациями внешнего теплового баланса океана. Максимум температуры для всех фронтов наблюдается в августе-сентябре. Максимальные СКО температуры ( $2 - 2.5^{\circ}\text{C}$ ) наблюдаются в Северном субтропическом фронте.

Совместный анализ сезонной и межгодовой изменчивости поля ТПО и характеристик фронтов показал, что существенный вклад межгодовой изменчивости в общую дисперсию поля ТПО наблюдается в зонах фронтов, связанных с интенсивными струйными течениями, такими как Гольфстрим (ФГ), Межпассатное противотечение (ССБЭФ), Северная ветвь Южного пассатного течения (ФСВ ЮПТ) (рис. 2). В этих районах отмечается интенсивное меандрирование течений и образование вихрей. В широких и менее интенсивных течениях, таких как Северо-Атлантическое (ССБТФ), Канарское и Северное пассатное (СТФ) уровень межгодового сигнала ТПО ослабевает и увеличивается вклад сезонной изменчивости ТПО.

Анализ распределения трендов ТПО по месяцам показал, что внутригодовые смещения области положительных трендов ТПО у берегов Северо-Западной Африки отражают сезонную динамику положения Северной ветви ССБЭФ, для которой характерны максимальные внутригодовые СКО широтного положения. В апреле область максимальных положительных трендов и фронт смещены к югу ( $10^{\circ}$  с.ш.), в октябре к северу ( $15 - 18^{\circ}$  с.ш.). В зоне ССБТФ осенью, когда фронт ослабевает и находится в северном положении, а температура фронта наиболее высокая, увеличиваются положительные тренды ТПО. Зимой, когда фронт усиливается и смещается на юг, положительные тренды ослабевают.

**Выводы.** Анализ внутригодовой изменчивости ТПО показал, что на большей части акватории Северной Атлантики сезонный ход в 2 – 3 больше, чем межгодовые вариации. Высокий уровень межгодовой изменчивости наблюдается в зонах климатических фронтов, связанных с интенсивными струйными течениями.

Использование спутниковых данных позволило впервые уточнить на поверхности океана положение двух ветвей ССБЭФ, а также детально проанализировать сезонную изменчивость характеристик фронтов. Показано, что самыми интенсивными яв-

ляются СВ ССБЭФ и ФСВ ЮПТ. Наибольшая сезонная изменчивость интенсивности характерна для ССБТФ, ССБЭФ на западе океана, ФСВ ЮПТ на востоке. Максимальные внутригодовые вариации широтного положения типичны для ССБТФ, СТФ, ССБЭФ и его Северной ветви.

Показано, что сезонные вариации характеристик одного и того же фронта на различных меридианах могут существенным образом различаться и в значительной степени связаны с особенностями распределения областей экстремальной межгодовой изменчивости ТПО.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.В. Артамонов, Е.А. Скрипалева. Сезонная и межгодовая изменчивость температуры поверхности океана по спутниковым данным // Сб. "Системы контроля окружающей среды", – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – С. 202 – 204.
2. Ю.В. Артамонов, А.Б. Полонский. Сезонная изменчивость гидрофизических характеристик Тропической Атлантики // Сб. "Исследования Тропической Атлантики", Севастополь, 1989. – С. 7 – 60.
3. К.Н. Федоров. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 296 с.
4. В.М. Грузинов. Гидрология фронтальных зон Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 272 с.
5. Ю.В. Артамонов, М.В. Бабий, А.Е. Букатов, Е.А. Скрипалева. Особенности пространственного распределения линейных трендов поля температуры в Атлантическом океане за период 1985 – 2001 гг. по данным спутниковых измерений // Тезисы доклада на Международной научной конференции «Фундаментальные исследования важнейших проблем естественных наук на основе интеграционных процессов в образовании и науке», Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – С. 96.
6. Ю.В. Артамонов, Е.А. Скрипалева. Структура и сезонная изменчивость крупномасштабных фронтов Атлантического океана по спутниковым данным // Исследования Земли из космоса, 2005. – № 4. – С. 62 – 75.