

**КРУПНОМАСШТАБНЫЕ
ЗОНАЛЬНЫЕ ФРОНТЫ
АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА В
СРЕДНИХ МНОГОЛЕТНИХ ПОЛЯХ
ТЕМПЕРАТУРЫ И СОЛЕНОСТИ
НА РАЗРЕЗЕ ВДОЛЬ 30° З.Д.**

**Ю.В. Артамонов, Н.П. Булгаков,
П.Д. Ломакин,
Е.А. Скрипальева, В.Н. Черемин**

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail:oaoi@alpha.mhi.iuf.net

На основе средних многолетних термохалинных данных современного океанографического массива (World Ocean Atlas, 1994) в плоскости трансокеанского разреза вдоль 30° з.д. протяженностью от берегов Антарктиды до Субтропиков Северного полушария выделены крупномасштабные фронты. Проанализирована их структура, интенсивность, расположение в пространстве. Приведены характеристики водных масс, взаимодействующих в системе исследуемых фронтов. Описаны особенности формирования крупномасштабных фронтальных разделов в различных климатических зонах Атлантики.

Введение. На протяжении практически всей истории океанографической науки океанические фронты служили объектом самого пристального внимания ученых различных стран. Исследованию их свойств посвящены многочисленные работы, составлены классификации фронтов Атлантики [1-5].

Вместе с тем, имеется целый ряд проблем, затрудняющих дальнейшее развитие океанографии фронтальных образований. Это отличия в номенклатуре фронтов, используемой в отечественной и зарубежной литературе и особо часто встречающиеся в Тропиках и южной части океана. Усложняют ситуацию введенные для обозначения климатических разделов и зон вергенций понятия "главный" и "вторичный фронт". Параллельное применение в различных работах для обозначения одного и того же явления терминов "фронт", "конвергенция" и "дивергенция" зачастую не только вносит терминологическую путаницу, но иногда подменяет физический смысл фронта, как зоны повышенных горизонтальных гради-

ентов характеристик водной среды. По мнению разных авторов существует различное количество климатических фронтов для одних и тех же акваторий океана [1]. Перечисленные выше проблемы в основном обусловлены тем, что исследования свойств океанических фронтальных разделов проводились на базе материалов отдельных гидрологических съемок или слабо обеспеченных первичной океанографической информацией климатических массивов 70-80 годов [2-5], а известные классификации фронтов в своей основе содержат различные признаки.

Цель предлагаемой работы – на основе современного климатического массива океанографических данных [6] выделить крупномасштабные фронты в среднем многолетнем термохалинном поле Атлантического океана на акватории от Субтропиков Северного полушария до берегов Антарктиды. Выявить особенности их структуры, интенсивности, положения в пространстве. Рассмотреть водные массы, взаимодействующих в системе исследуемых фронтов.

Материалы и методика. В качестве исходных данных использован массив средних годовых значений температуры и солености, приведенных при помощи процедур объективного анализа в узлы регулярной одноградусной сетки и на стандартные горизонты от поверхности до дна [6]. По этим данным были получены распределения температуры, солености и рассчитаны меридиональные градиенты этих характеристик. Вертикальная структура фронтов рассматривалась на меридиональном трансокеанском разрезе вдоль 30° з.д., который пересекал все климатические зоны Атлантического океана от берегов Антарктиды до 40° с.ш. Выделение фронтов проводилось по классическому критерию максимума горизонтального градиента в полях температуры и солености [2, 3]. В тексте статьи этим величинам присвоены аббревиатуры МГТ и МГС соответственно. Положение и характеристики ядер основных водных масс определялись с помощью статистического T,S-анализа. Анализ распределений термохалинных характеристик и их меридиональных горизонтальных градиентов позволил выделить также крупномасштабные зоны вергенций. Величины максимальных градиентов температуры в °C/100 км и солености в ‰/100 км приведены в скобках.

Результаты. На крайнем юге разреза в море Уэдделла ($70\text{--}75^\circ$ ю.ш.) наблюдается область максимальных отрицательных значений МГТ (-0,4) и МГС (-0,6). Она расположена у материкового склона на глубине от 100-150 до 700-800 м (рис. 1, 2). Здесь, между материковым склоном Антарктиды и Западным прибрежным течением, происходит опускание холодных и низкосоленных вод, которые служат источником Глубинной водной массы моря Уэдделла (ГВМУ). Крупномасштабный термохалинnyй фронт, совпадающий с Западным прибрежным течением, мы назвали Фронтом Западного прибрежного течения (ФЗПТ). Область между берегом Антарктиды и ФЗПТ характеризуется явными признаками климатической зоны. Здесь формируется собственная водная масса. В литературе эта природная зона также не имеет определенного наименования. В данной работе она именуется Антарктической прибрежной зоной (АПЗ) (рис. 3).

Далее на север, в области между 70° и 55° ю.ш., на глубине более 150 м горизонтальные градиенты термохалинных характеристик ослаблены, а изотермы и изопикины имеют характерную куполообразную форму. Здесь воды более теплые и соленые по сравнению с окружающими. Данная структура вод идентифицирует зону Антарктической дивергенции (АД) [4], где Циркумполярная глубинная водная масса (ЦГВ) поднимается к поверхности океана. Ось АД имеет слабый наклон, на глубине 150-200 м она расположена в районе приблизительно 69° ю.ш., с глубиной смещается на север до 64° ю.ш.. ЦГВ характеризуется монотонным понижением температуры с глубиной, которая с отметок, превышающих 1200 м в море Уэдделла и 2000 м в море Скотия, становится отрицательной, а соленость с глубиной остается почти неизменной.

На северной границе моря Скотия, примерно между 50° и 55° ю.ш., проявляется Антарктический полярный фронт (АПФ). Высокие абсолютные значения МГТ (~0,1) прослеживаются практически до дна. При этом фронтальный раздел АПФ существенно не изменяет свое положение с глубиной. В пределах фронта по вертикали достаточно четко выделяются три слоя, в которых взаимодействуют различные вод-

ные массы. В верхнем 250-метровом слое фронт образуется в результате взаимодействия Антарктической зимней водной массы (АЗВ) и Антарктической промежуточной водной массы (АПрВ). Подповерхностный минимум температуры АЗВ заглублен почти до 200-250 м. МГТ (-0,6) в слое минимума отрицательный, МГС (0,05) – положительный. Глубже 250 м Антарктический полярный фронт представляет собой раздел, возникающий между АПрВ и ЦГВ. Поскольку Циркумполярная глубинная водная масса более теплая и соленая, чем АПрВ, на промежуточных глубинах в пределах АПФ наблюдаются положительные МГТ (0,04) и МГС (0,08). Градиенты температуры и солености становятся снова отрицательными глубже 800 и 1500 м соответственно. В этих слоях АПФ формируется в результате взаимодействия ЦГВ и Североатлантической глубинной водной массы (САГВ). САГВ является более теплой и соленой по сравнению с ЦГВ. Трансформация САГВ в зоне фронта более четко проявляется в поле температуры, при этом зона МГТ (-0,1) расположена между 47° и 50° ю.ш. На этих глубинах распределение МГС носит пятнистый характер и его достаточно сложно связать с положением АПФ. Область океана между Фронтом Западного прибрежного течения и Антарктическим полярным фронтом называют Антарктической зоной (А3) [5].

Следующая по направлению на север климатическая зона океана – Полярная зона (ПЗ). Она ограничена с юга и севера соответственно Антарктическим полярным и Субантарктическим (САФ) климатическими фронтами. На рассматриваемом разрезе Субантарктический фронт проявляется в виде высоких значений МГТ (-1,3) и МГС (-0,19), наблюдавшихся между 42° и 45° ю.ш. На поверхности климатическая Полярная зона Южной Атлантики занимает полосу между 45° и 58° ю.ш. Здесь расположена Антарктическая конвергенция (АК), в пределах которой происходит опускание поверхностных вод и формирование АПрВ. Горизонтальные градиенты температуры и солености увеличиваются к северной границе ПЗ и достигают максимума в области фронтального раздела САФ. Этот фронт – самый интенсивный из системы рассмотренных выше фронтов Южной Атлантики, хотя вертикальная мощность его меньше,

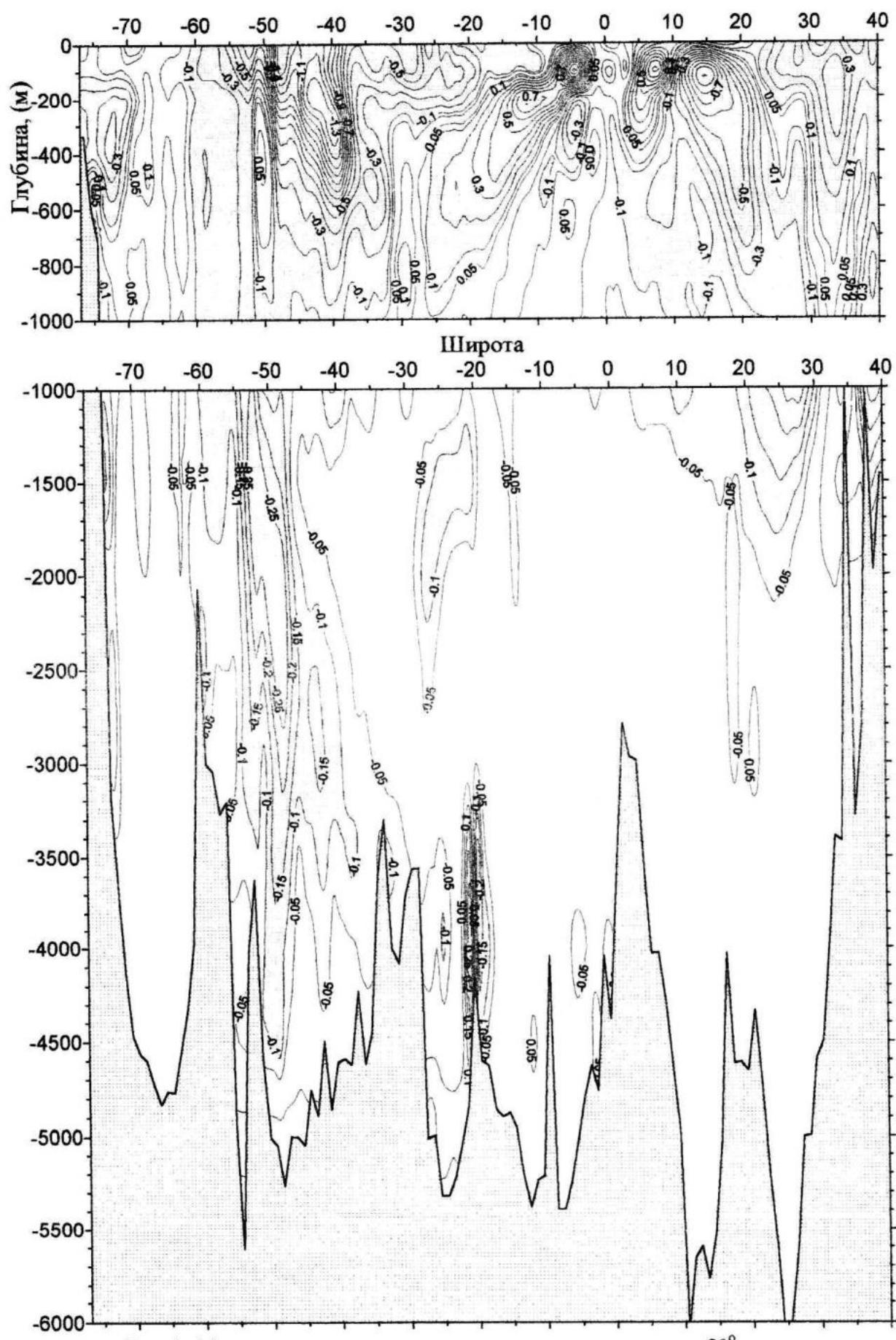


Рис. 1 - Меридиональные градиенты температуры на разрезе по 30°з.д.

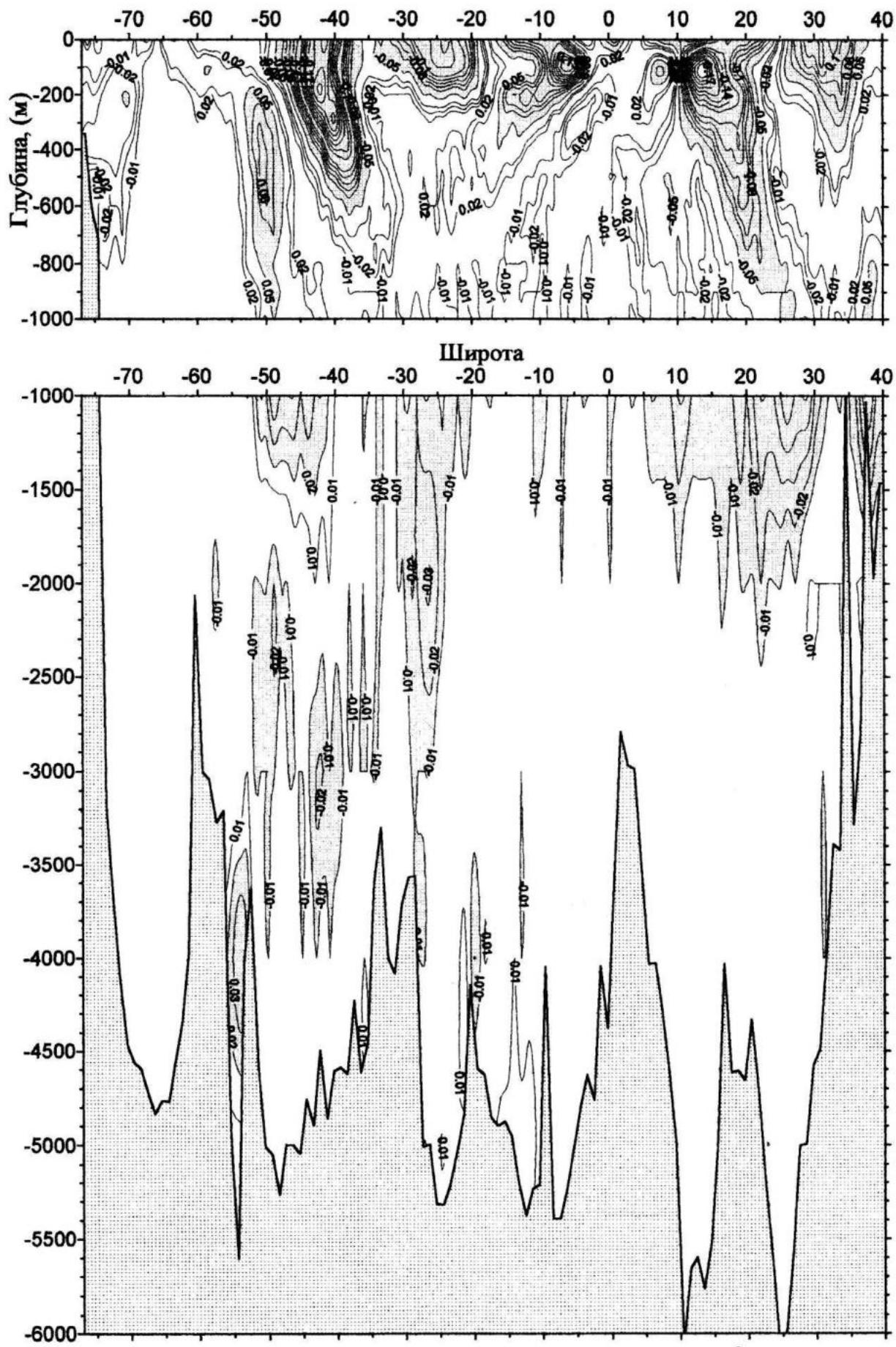


Рис. 2 - Меридиональные градиенты солености на разрезе по 30° з.д.

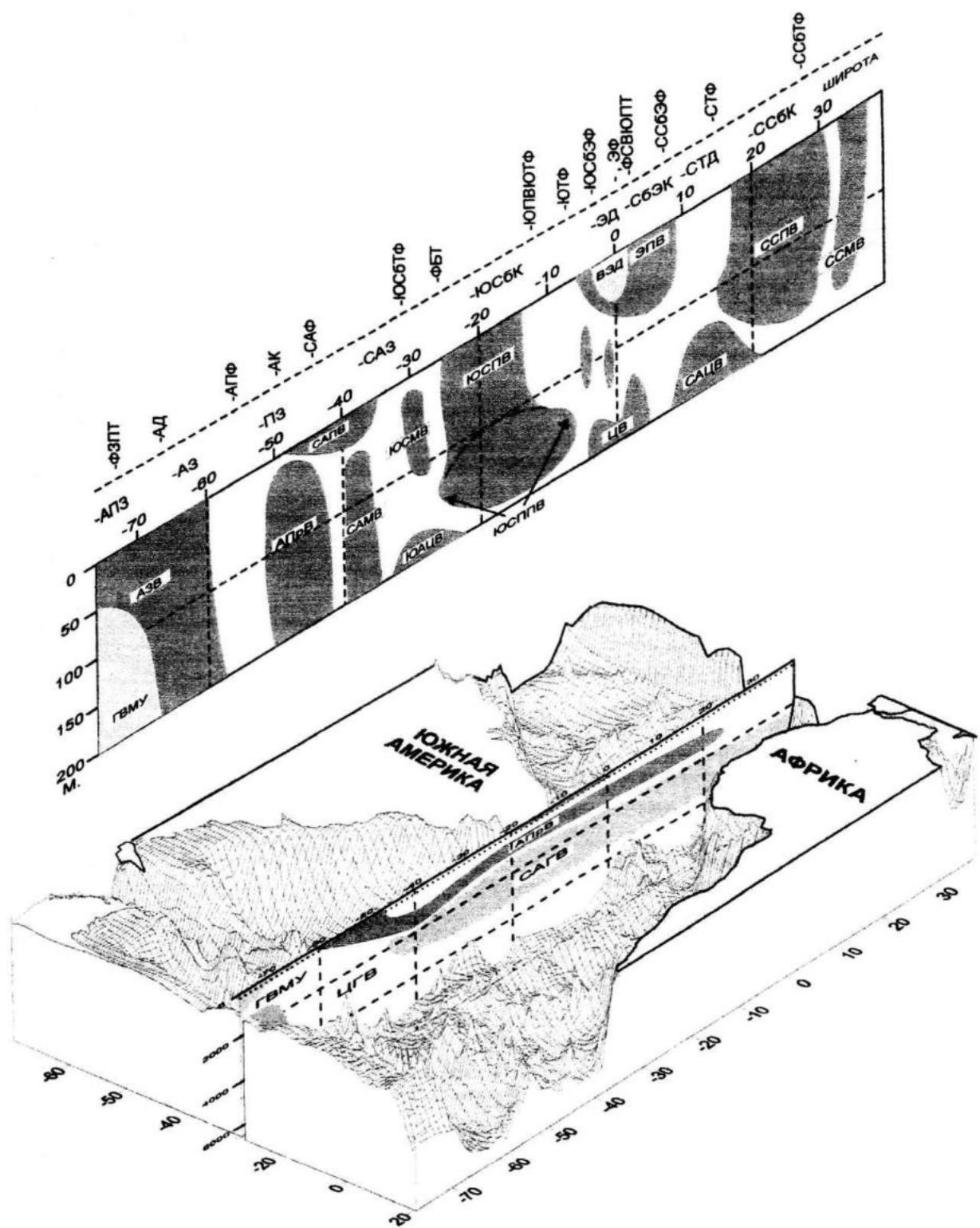


Рис. 3- Фронты, зоны вергенций и водные массы на разрезе по 30° з. д

чем АПФ, и глубина проникновения ограничена слоем АПрВ (800 м).

К северу от САФ расположена Субантарктическая зона (САЗ) [1, 5]. Здесь формируется Субантарктическая поверхность водной массы (САПВ). На Т,S-кривой она характеризуется минимумом солености в верхнем 50-метровом слое. Подповерхностный максимум солености в Субантарктической зоне ослаблен. Ее северная граница проявляется в виде экстремума градиентов температуры (-0,6) около 30° ю.ш. В литературе северную границу САЗ именуют Субтропическим фронтом (СБТФ) [1, 5]. Мы уточняем аббревиатуру, добавляя прилагательное “южный” – ЮСБТФ. Этот фронт наиболее развит в слое 0-100 м. Известно, что холодные воды Фолклендского течения в зоне их слияния с водами Бразильского течения разворачиваются на восток. Это сопровождается усиливением температурных контрастов на северной границе САЗ. В поле солености ЮСБТФ проявляется слабо.

Характерную особенность подповерхностной структуры вод в САЗ представляет термостад (халистад и пикностад), который особенно четко выражен на западе океана. Этот слой связан с зимней водой в Субантарктической зоне между ЮСБТФ и САФ, которая именуется Субантарктической модовой водной массой (САМВ) [8, 11, 12]. Некоторые авторы рассматривают эту воду как часть центральных вод [11]. Южноатлантическая центральная водная масса (ЮАЦВ) располагается на глубинах 150-400 м под слоем субтропического максимума солености в Субтропической и Тропической зонах Южной Атлантики [9]. ЮАЦВ более теплая и соленая по сравнению с Антарктической промежуточной водной массой, которая расположена глубже. В Тропической Атлантике АПрВ залегает на глубинах около 700-900 м и распространяется на север. Признаком ядра АПрВ служит промежуточный минимум солености.

В районе 25° ю.ш. в слое 0-200 м наблюдаются большие значения меридионального градиента солености (-0,15), связанные с Бразильским течением, которое в южной части Бразильской котловины разворачивается на восток. Оно несет более пресные воды по сравнению с солеными водами центральной части Южного субтропического антициклонического круговорота

(ЮСАК), формируя соленостный Фронт Бразильского течения (ФБТ). Этот фронтальный раздел ограничивает с юга область распространения наиболее соленых субтропических вод.

В подповерхностном слое между ФБТ и ЮСБТФ также формируется собственный тип субтропической водной массы, более холодной и менее соленой, чем воды центральной части ЮСАК. Ее называют Южной субтропической модовой водной массой (ЮСМВ) [7]. Севернее ФБТ располагается Южная субтропическая поверхность водная масса (ЮСПВ). Она выделяется по области максимальной солености в поверхностном слое в районе 15-20° ю.ш. Эти высокосоленые воды простираются к экватору и на юг в виде подповерхностного халинного максимума. В отечественной литературе эту область часто называют зоной “халистатики”, а ее ось – Южной субтропической конвергенцией (ЮСБТК) [8, 9]. На Т,S-кривой ЮСПВ представлена верхним халинным максимумом. С глубиной соленость относительно медленно уменьшается и на 150-200 м ЮСПВ подстилается резкими галоклином и термоклином.

В подповерхностном слое тропиков и субтропиков Южного полушария выделяют Южную субтропическую подповерхностную водную массу (ЮСППВ) [5, 8, 9]. На Т,S-кривой ЮСППВ характеризуется подповерхностным максимумом солености в диапазоне температур 20-26°C. Этот максимум хорошо прослеживается к северу и югу от зоны халистатики. Он заметно увеличивает свою глубину почти до 200 м в Субантарктической зоне (между ЮСБТФ и САФ), при этом температура в нем понижается

Северная граница зоны халистатики отделяется от тропических и экваториальных поверхностных вод хорошо развитым в поле температуры и солености фронтом, который именуют Южным тропическим фронтом (ЮТФ) [3]. Этот фронт наиболее развит в слое 0-150 м, при этом максимум положительных значений МГТ(1,4) и МГС (0,17) отмечается на глубине 100 м соответственно около 5° и 7° ю.ш. Существенные горизонтальные градиенты температуры и солености, определяющие фронтальный раздел, сохраняются до глубины 600-800 метров. В плоскости меридиана фронтальный раздел с глубиной заметно смещается к

югу. У поверхности ЮТФ расположен около $5\text{--}7^\circ$ ю.ш., на глубине 600 м он смещен почти до 15° ю.ш. На глубинах 200-250 м около $10\text{--}12^\circ$ ю.ш наблюдается второе ядро больших значений МГТ (0,8) и МГС (0,1). Известно, что на широте $8\text{--}9^\circ$ ю.ш. проходит стрежень Южного экваториального противотечения [5, 9]. Это течение делит ЮТФ на две ветви. Необходимо отметить, что этот факт в литературе ранее не обсуждался. В данной работе северную (основную) ветвь ЮТФ, которая располагается в окрестностях 5° ю.ш., мы называем, как и ранее, – Южный тропический фронт, другой ветви в районе $10\text{--}12^\circ$ ю.ш мы дали название – Южная подповерхностная ветвь ЮТФ (ЮПВЮТФ). Она образуется в результате взаимодействия двух модификаций ЮАЦВ. Южноатлантическая центральная водная масса, располагающаяся к северу от фронта, более холодная и имеет более низкую соленость за счет значительной примеси АПрВ.

В районе $4\text{--}5^\circ$ ю.ш., под ЮТФ в слое 150-450 м, наблюдается область повышенных отрицательных значений меридиональных градиентов температуры (-0,4) и солености (-0,04). Она связана с заглублением изотерм и изохалин к экватору в области подтермоклинового восточного течения. [5]. В известных классификациях крупномасштабных фронтов [1, 3] это образование не описано, хотя и имеет все признаки климатического фронта. Этот фронт мы назвали Южным субэкваториальным фронтом (ЮСБЭФ). Он отделяет относительно теплые и соленые воды Экваториальной конвергенции (ЭК) – Водную массу Экваториальной конвергенции (ВЭК) на севере от более холодной и менее соленой ЮАЦВ на юге.

Около экватора ($0\text{--}2^\circ$ с.ш.) в слое 0-50 м отмечается экстремум отрицательных значений МГТ (-0,1) и положительных значений МГС (0,08). Природа этого экстремума связана с подъемом к поверхности океана холодных и более соленных подповерхностных вод в зоне Экваториальной дивергенции (ЭД). Хотя вертикальная мощность этого фронта невелика, тем не менее он является устойчивой климатической структурой и формируется различными водными массами: Водной массой Экваториальной дивергенции (ВЭД) и Поверхностной эква-

ториальной водной массой (ЭПВ). Мы называем его Экваториальным фронтом (ЭФ).

Другой особенностью поля МГТ является его экстремум (-0,1) в районе $3\text{--}4^\circ$ с.ш. Здесь, на глубинах 50-150 м, наиболее четко выражено взаимодействие холодных вод ЭД с более теплыми водами Субэкваториальной конвергенции (СбЭК), ось которой расположена около 4° с.ш. Географически этот экстремум МГТ совпадает с положением Северной ветви Южного Пассатного течения. Поэтому мы дали название этому фронту – Фронт Северной ветви ЮПТ (ФСВЮПТ). Этот фронт формируется в результате наклона сезонного термоклина, обусловленного особенностями поля ветра в приэкваториальной области [5].

Между 5° и 10° с.ш. наблюдается область положительных максимальных значений МГТ (0,9) и МГС (0,07). Здесь расположено Межпассатное противотечение, с которым связывают существование Северного субэкваториального фронта (ССбЭФ). Глубина проникновения фронта около 400 м. В меридиональной плоскости с глубиной он приближается к экватору. В верхней части этот фронт разделяет теплые воды зоны СбЭК и более холодные воды Северной тропической дивергенции (СТД), которые представлены Североатлантической центральной водной массой (САЦВ). Ось СТД расположена около 10° с.ш. Северная граница СТД хорошо выделяется по области максимальных отрицательных значений МГТ (-0,9) и МГС (-0,2) в районе $14\text{--}15^\circ$ с.ш. Здесь действует Северное пассатное течение, с которым связан Северный тропический фронт (СТФ). Наиболее мощные градиенты сосредоточены в слое 100-200 м, где фронт разделяет САЦВ и Северную субтропическую подповерхностную водную массу (ССППВ). Однако фронт прослеживается также в промежуточных и глубинных слоях до 2000 м.

Между параллелями 15° с.ш. и 30° с.ш. расположена Северная субтропическая конвергенция (ССбТК). Положение оси ССбТК на поверхности в поле температуры и солености не совпадает. Максимум температуры наблюдается около 18° с.ш., максимум солености – около 25° с.ш. С увеличением глубины ось ССбТК смещается к 30° с.ш. Северная граница ССбТК представляет собой область экстремальных зна-

чений МГТ (0,4) и МГС (0,11), которая на поверхности океана наблюдается около 28° с.ш. и с глубиной смещается к 34° с.ш. Соответственно его аналогу в Южном полушарии, мы называем этот фронт Северным субтропическим (ССБТФ). Он разделяет Северную субтропическую поверхность водную массу (ССПВ) и Северную субтропическую модовую водную массу (ССМВ).

Заключение. На основе климатического массива гидрологических данных проанализирована структура крупномасштабных фронтов в центральной части Атлантического океана от берега Антарктиды до 40° с.ш. и от поверхности до дна. Выявлено, что Антарктический полярный и Северный тропический фронты отличаются максимальным развитием по вертикали и распространяются от поверхности до дна и до 2000 м соответственно. Мощность фронтов приэкваториальной области не превышает нескольких сотен метров. Разница в вертикальной протяженности фронтов прежде всего обусловлена тем, что южнее $40-45^{\circ}$ ю.ш. существуют источники формирования климатических промежуточных и глубинных водных масс (АПрВ и ЦГВ). Взаимодействие этих водных масс и особенности крупномасштабного поля ветра приводят к образованию мощнейшей системы фронтов Мирового океана – Антарктического полярного и Субантарктического. В Тропической зоне источники формирования водных масс менее интенсивны, а фронты в основном формируются в результате наклонов сезонного термоклина под воздействием крупномасштабного поля ветра.

Положение и количество крупномасштабных фронтов асимметрично относительно экватора, что обусловлено асимметрией крупномасштабных центров атмосферного воздействия.

Выделены фронты, ранее не описанные в литературе: Южная подповерхностная ветвь Южного тропического фронта, Южный субэкваториальный фронт, Фронт Северной ветви Южного пассатного течения.

Показано, что проявление фронтов и зон вергенций в полях различных термохалинных характеристик неодинаково.

Интенсивность зон максимальных горизонтальных градиентов в полях температуры и солености в пределах одного и того же климатического фронта может не совпадать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д. Фронты Атлантического сектора Южного океана (обзор литературы). Препринт. МГИ НАНУ, Севастополь, 1999, 68 с.
2. Булгаков Н.П. Структура Субарктического фронта в северо-западной части Тихого океана. Океанологические исследования, 1968, 19, с. 70-93.
3. Грузинов В.М. Гидрология фронтальных зон Мирового океана. Гидрометеоиздат. Ленинград, 1986, 272 с.
4. Саруханян Э.И., Смирнов Н.П. Водные массы и циркуляция Южного океана. Гидрометеоиздат. Ленинград, 1986, 288 с.
5. Peterson R.G., Stramma L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. Prog. Oceanogr., 1991, 26, P. 1-73.
6. Levitus S., Boyer P.T. World Ocean Atlas. U.S. CD-ROM Data Sets. National Oceanographic Data Center, Ocean Climate Laboratory, Washington, D.C, June, 1994.
7. Tsuchiya N., Lynne D., Talley and McCartney M.S. Water-mass distribution in the western South Atlantic; A section from South Georgia Island (54° S) northward across the equator. J. Mar. Res., 1994, V.52, N1, P. 55-81.
8. Stramma L., England M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic ocean. J. Geophys. Res., 1999, V.104, NC9, P. 20.863-20.883.
9. Ханайченко Н.К. Система экваториальных противотечений в океане. Гидрометеоиздат. Ленинград, 1974, 176 с.
10. Хлыстов Н.З. Структура и динамика вод тропической Атлантики. – Киев: Наук. Думка, 1976, 165 с.
11. Tsuchiya M. Thermostads and circulation in the upper layer of the Atlantic Ocean. Prog. Oceanogr., 1986, 16, P. 235-267.
12. McCartney M.S. The subtropical recirculation of Mode Water. J. Marine Res., 1982, 40 (Suppl.), P. 427-464.