

Экспериментальные и экспедиционные исследования

УДК 551.46(269.4)

Ю.В. Артамонов, Н.П. Булгаков, П.Д. Ломакин, Е.А. Скрипалева

Сезонная изменчивость термохалинных характеристик и объемно-статистических параметров водных масс в проливе Дрейка

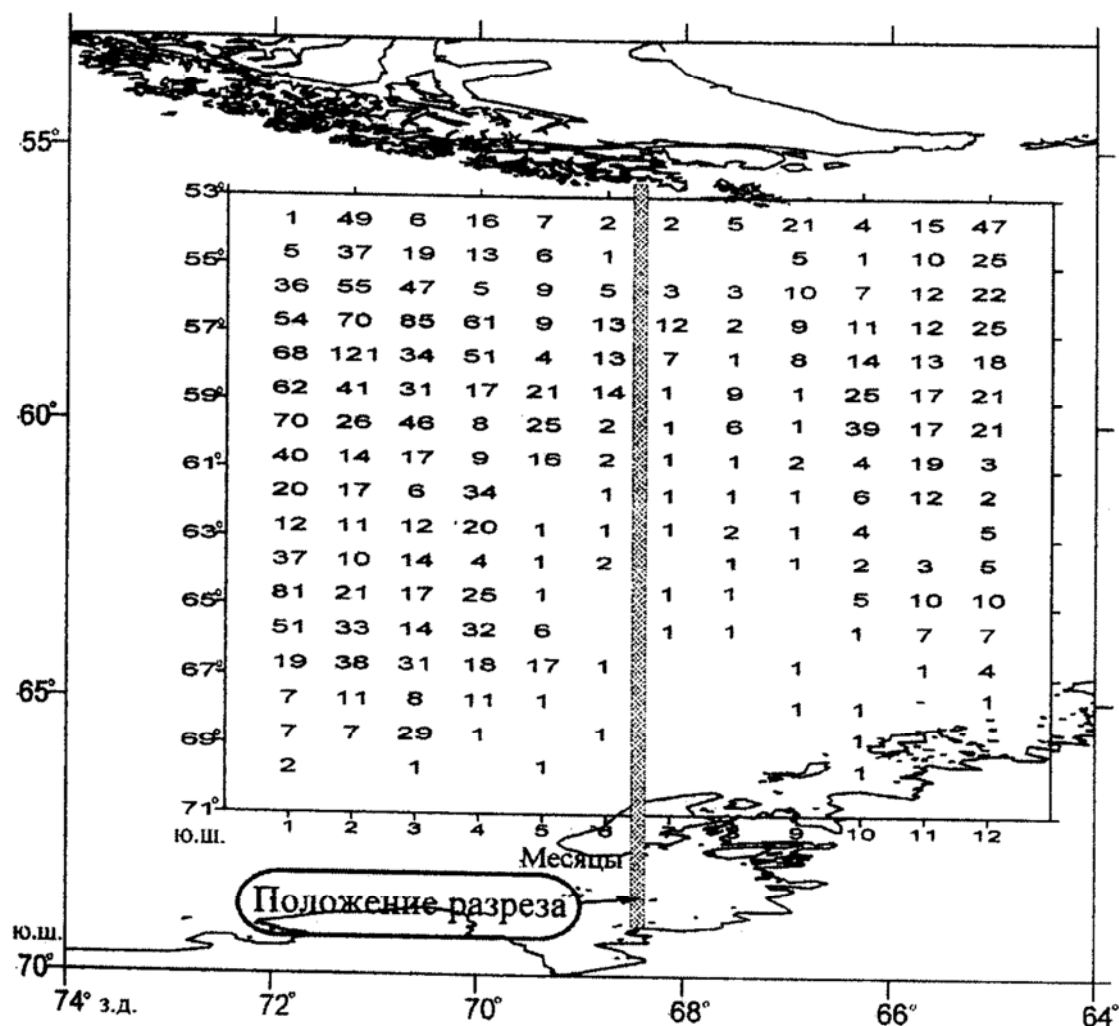
На основе многолетних средних месячных термохалинных данных океанографического массива исследованы некоторые закономерности сезонного цикла в полях температуры, солености и характеристиках водных масс в проливе Дрейка. Получены и проанализированы амплитудно-фазовые параметры сезонных колебаний исследуемых величин. При помощи объемно-статистического T, S -анализа на количественном уровне оценены внутригодовые вариации объемов основных водных масс пролива. Обсуждены возможные механизмы, обуславливающие рассматриваемые явления в проливе Дрейка.

Введение. Известный в океанографии метод объемно-статистического T, S -анализа, получивший довольно широкое распространение при изучении различных акваторий океанов и морей [1 — 4], до настоящего времени пока не нашел соответствующего применения в океанографических исследованиях в Антарктике. Причина этому — слабая обеспеченность данного региона Мирового океана экспериментальной океанографической информацией. Учитывая широкие возможности указанного метода, которые позволяют получить количественные характеристики объемов водных масс, проследить их изменения во времени и пространстве, а также выйти на возможные механизмы, вызывающие тот или иной вид изменчивости, мы попытались применить его к акватории пролива Дрейка. Согласно [5], этот регион — один из наиболее обеспеченных первичными океанографическими данными районов Антарктики.

Цель предлагаемой работы — на основе климатического массива океанографических данных [6] исследовать особенности сезонного цикла в полях температуры и солености; выделить основные водные массы и оценить их объемы; выявить закономерности пространственного распределения и внутригодовой изменчивости параметров водных масс; определить факторы, обуславливающие сезонные вариации анализируемых характеристик среды. Также рассмотрен вопрос взаимосвязи изменчивости водных масс с положением крупномасштабных фронтов. Основной физической концепцией при этом послужило представление о том, что крупномасштабные термохалинные фронты представляют собой границы раздела климатических водных масс, а внутригодовая изменчивость положения и интенсивности каждого фронта тесным образом связана с изменением объемов взаимодействующих в его системе водных масс [7].

© Ю.В. Артамонов, Н.П. Булгаков, П.Д. Ломакин, Е.А. Скрипалева, 2004

Материалы и методика исследования. В качестве исходных данных использован массив средних месячных значений температуры и солёности, приведенных с помощью процедур объективного анализа в узлы регулярной одноградусной сетки и на стандартные горизонты от поверхности до 1000 м [6]. Внутригодовая обеспеченность акватории пролива фактическими океанографическими наблюдениями для одноградусных широтных полос между меридианами 67 и 71° з. д. показана на рис. 1.

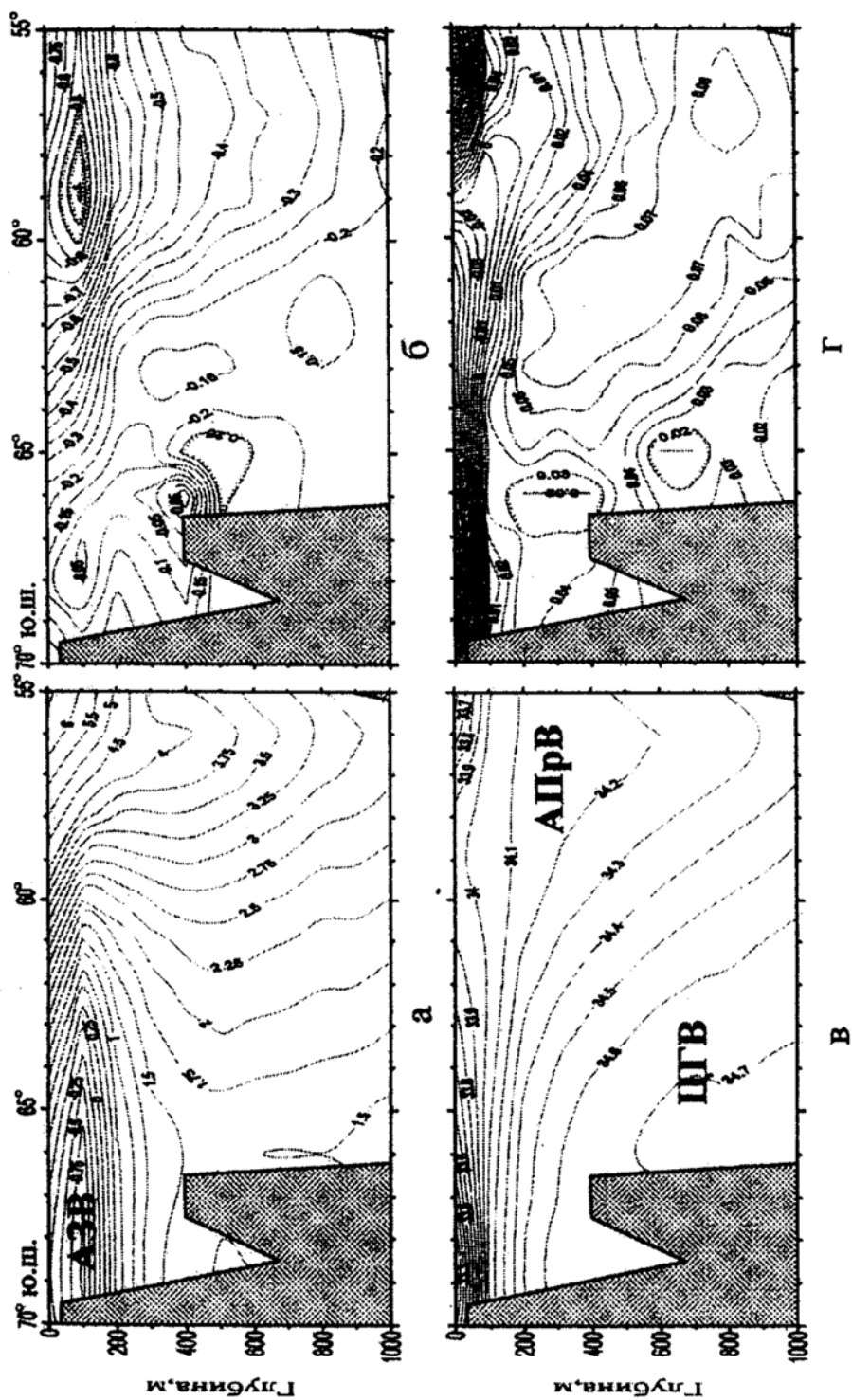


Р и с. 1. Положение разреза и количество гидрологических станций (врезка), выполненных в одноградусных широтных полосах между 67 и 71° з. д.

Основные результаты получены путем использования различных модификаций метода объемно-статистического T, S -анализа в сочетании с гармоническим анализом. Расчеты проведены для меридиональной полосы шириной 60 миль вдоль меридиана 69° з. д. В качестве условной единицы элементарного объема $V = 120 \text{ км}^3$ принят объем параллелепипеда с площадью основания 60×60 миль и высотой 10 м. Для этого все исходные данные в слое 0 — 1000 м были интерполированы на горизонты, кратные 10 м.

Расчеты и анализ выполнены в такой последовательности. Вначале рассмотрены особенности фоновой термохалинной структуры на меридиональном разрезе через пролив Дрейка, где выделены крупномасштабные фронты и водные массы; проанализированы характеристики годовой гармоники внутригодовых колебаний температуры и солености. Затем для каждого месяца получены объемно-статистические T , S -диаграммы, а также рассмотрены распределения элементарных объемов вод со сходными (до заданных градаций) T , S -индексами в координатных плоскостях «широта, интервал температуры», «широта, интервал солености», «широта, интервал плотности». Далее исследованы интегральные характеристики водных масс — суммы элементарных объемов вод в заданных интервалах термохалинных параметров. Для каждого параметра и интервала при помощи гармонического анализа рассчитаны амплитуды и фазы (месяц наступления максимумов объемов водных масс) годовой гармоники. Достоверность расчета амплитудного состава оценена по отношению амплитуды годовых вариаций к среднему квадратичному отклонению остаточного ряда. Выявлены и описаны закономерности сезонного хода объемов основных водных масс и пространственных вариаций интенсивности их внутригодовых колебаний в зависимости от метеорологических факторов и фронтальной структуры вод пролива.

Анализ результатов. Известно [5, 8], что в проливе Дрейка существуют четыре крупномасштабных квазизонально ориентированных фронтальных раздела — Шельфовый фронт у оконечности Южно-Американского материка и следующие за ним по направлению на юг климатические фронты: Субантарктический (САФ), Антарктический Полярный (АПФ) и фронт Южной ветви Антарктического Циркумполярного течения. Последний из перечисленных фронтов на акватории пролива называют Границей континентальных вод (ГКВ) [5]. Каждый из фронтов представляет собой область активного взаимодействия различных водных масс. Шельфовый фронт отделяет водную массу шельфа на севере пролива, подверженную активному влиянию материкового стока, от субантарктических поверхностной (СБАПВ) и подповерхностной (СБАПпВ) водных масс, которые располагаются севернее САФ. Субантарктический фронт отделяет СБАПВ и СБАПпВ от антарктической промежуточной водной массы (АПрВ), формирующейся между САФ и АПФ [5, 9]. В области Антарктического Полярного фронта взаимодействуют антарктическая промежуточная водная масса с одной стороны и антарктическая зимняя водная масса (АЗВ) в слое 0 — 200 м и циркумполярная глубинная водная масса (ЦГВ) на промежуточных глубинах с другой. Граница континентальных вод представляет собой раздел между АЗВ и ЦГВ, располагающимися со стороны океана, и водами «высокоширотной модификации», которые формируются на мелководье у Антарктического континента [5, 10].



Р и с. 2. Распределение среднегодовых температуры T , °C (а), солёности S , ‰ (б) и меридиональных градиентов температуры (б) и солёности (г) на разрезе через пролив Дрейка (69° з. д.)

Рассмотрим фоновую вертикальную структуру вод на разрезе через пролив Дрейка в полях среднегодовых значений температуры, солёности и меридиональных градиентов этих характеристик, которые представлены на рис. 2. Видно, что типичные для пролива крупномасштабные фронтальные разделы, которые отчетливо проявляются в фактических термохалинных полях, в среднегодовой структуре в явном виде не везде прослеживаются. Однако признаки САФ и АПФ и примерное положение их фронтальных разделов могут быть достаточно однозначно определены в полях температуры и солёности и градиентов обеих характеристик среды. В районе 59° ю. ш. на глубине 100 м наблюдается максимум отрицательных значений меридионального градиента температуры (МГТ) (до $1^\circ\text{C}/60$ миль). Здесь отмечаются также повышенные отрицательные значения меридионального градиента солёности (МГС) ($-0,01$ — $-0,02$ ‰ /60 миль), которые характерны для северной границы АПрВ. Зона экстремальных значений МГС в целом простирается примерно от 61° ю. ш. на поверхности до 57° ю. ш. на глубине 400 м. К северу от областей МГТ и МГС располагаются теплые воды ($>4^\circ\text{C}$). Такая структура вод характерна для Субантарктического фронта.

Антарктический Полярный фронт в сглаженном среднегодовом поле температуры явно не прослеживается. В поле солёности наблюдается зона повышенных положительных значений МГС, имеющих ярко выраженный наклон к северу (рис. 2). Она расположена в слое 200 — 800 м между меридианами 63 и 67° ю. ш., обозначает границу между ЦГВ и АПрВ и представляет глубинную часть АПФ.

Два других крупномасштабных фронта, Шельфовый и ГКВ, хорошо выражены в поле меридионального градиента солёности. Наблюдаемый в северной части пролива (56° ю. ш.) высокий положительный меридиональный градиент солёности в слое 0 — 100 м свидетельствует о существовании резкой границы между прибрежными распресненными водами и водами открытых акваторий пролива — Шельфовом фронте. Самый южный фронтальный раздел — Граница континентальных вод — хорошо виден по резкому уменьшению температуры и солёности по направлению к шельфу Антарктического п-ова в районе 68° ю. ш. (рис. 2).

Приведенные выше сведения об особенностях вертикальной термохалинной структуры свидетельствуют о том, что среднее многолетнее поле этих характеристик в исследуемом регионе, несмотря на существенно сглаженные детали, в целом содержит информацию о крупномасштабных фронтах и взаимодействиях в них водных массах. Исследование сезонной изменчивости T , S -характеристик и объемов водных масс позволяет идентифицировать различные фронты и расширить наши представления об особенностях внутригодового хода водных масс в пределах фронтальных зон.

Оценки амплитуд и фаз годовой гармоники во внутригодовом ходе температуры и солёности показали следующее. Максимальная амплитуда годовой гармоники температуры наблюдается на поверхности океана и достигает почти 2°C . Максимум температуры отмечается в марте, в конце периода летнего теплонакопления.

В поле солёности наибольшие сезонные изменения с амплитудой около $0,16$ ‰ наблюдаются на юге и севере пролива Дрейка в шельфовых водах.

Здесь максимальная соленость поверхностных вод (33,90 — 34,00 ‰) отмечается весной, в конце периода зимнего выхолаживания (наиболее мощного льдообразования) и минимальных сумм осадков. Характерно, что в подповерхностном слое 100 — 200 м южнее АПФ максимально соленые воды наблюдаются в конце лета — осенью, т. е. в период, когда вертикальная стратификация вод наиболее развита и препятствует распространению конвективных токов от поверхности океана в подповерхностные слои. Достаточно выраженные сезонные колебания как температуры, так и солености охватывают слой 0 — 200 м. Глубже на преобладающей части площади разреза сезонный сигнал в термохалинном поле слаб и определяется ненадежно.

Рассмотрим объемно-статистические характеристики основных водных масс пролива. На рис. 3 представлена объемно-статистическая T, S -диаграмма, а также диаграммы изменения элементарных объемов вод в зависимости от широты и градаций температуры, солености, условной удельной плотности. Все графики относятся к январю. Видно, что максимальные объемы вод наблюдаются в диапазонах температуры 1 — 4 °C, солености — 34,10 — 34,75 ‰ и плотности 27,0 — 27,8 усл. ед. При этом в полях солености и плотности выделяются два ядра (34,15 ‰, 27,1 усл. ед. и 34,65 ‰, 27,7 усл. ед.), соответствующие АПрВ и ЦГВ. Эти ядра располагаются по разные стороны от АПФ, фронтальный раздел которого, судя по перемычке минимальных объемов, находится на 58 — 60° ю. ш. В поле температуры и на объемно-статистической T, S -диаграмме эти водные массы выделяются менее четко.

Для исследования особенностей сезонного цикла параметров водных масс рассмотрен их интегральный параметр — сумма элементарных объемов вод с T, S -индексами, соответствующими градациям температуры, солености и плотности. Эта характеристика была рассчитана для каждого календарного месяца года. Ее внутригодовой ход, а также амплитудно-фазовые характеристики прослежены на каждом заданном интервале термохалинных параметров (рис. 4). Достоверность расчета амплитуд сезонных колебаний объемов водных масс определялась по отношению годовой амплитуды $A_{\text{год}}$ к среднему квадратичному отклонению остаточного ряда (RMS).

Как видно из рис. 4 (справа), для наибольших объемов вод (основные пики их внутригодового хода) отношение амплитуды годовых колебаний $A_{\text{год}}$ к RMS превышает 1, что свидетельствует о значимости полученных результатов. Основным максимум повторяемости объемов вод соответствует значениям температуры 2 °C (рис. 4, а), солености 34,60 — 34,70 ‰ (рис. 4, б) и плотности 27,7 — 27,8 усл. ед. (рис. 4, в). Эти параметры совпадают с характеристиками циркумполярной глубинной водной массы. Вторым максимум повторяемости объемов вод наблюдается при значениях солености 34,25 ‰ (рис. 4, б) и плотности 27,2 усл. ед. (рис. 4, в). Согласно существующим представлениям, эти термохалинные индексы близки к значениям солености и плотности в ядре антарктической промежуточной водной массы [5, 8, 9, 10]. Объем других водных масс в проливе Дрейка существенно меньший по сравнению с объемом указанных выше основных вод.

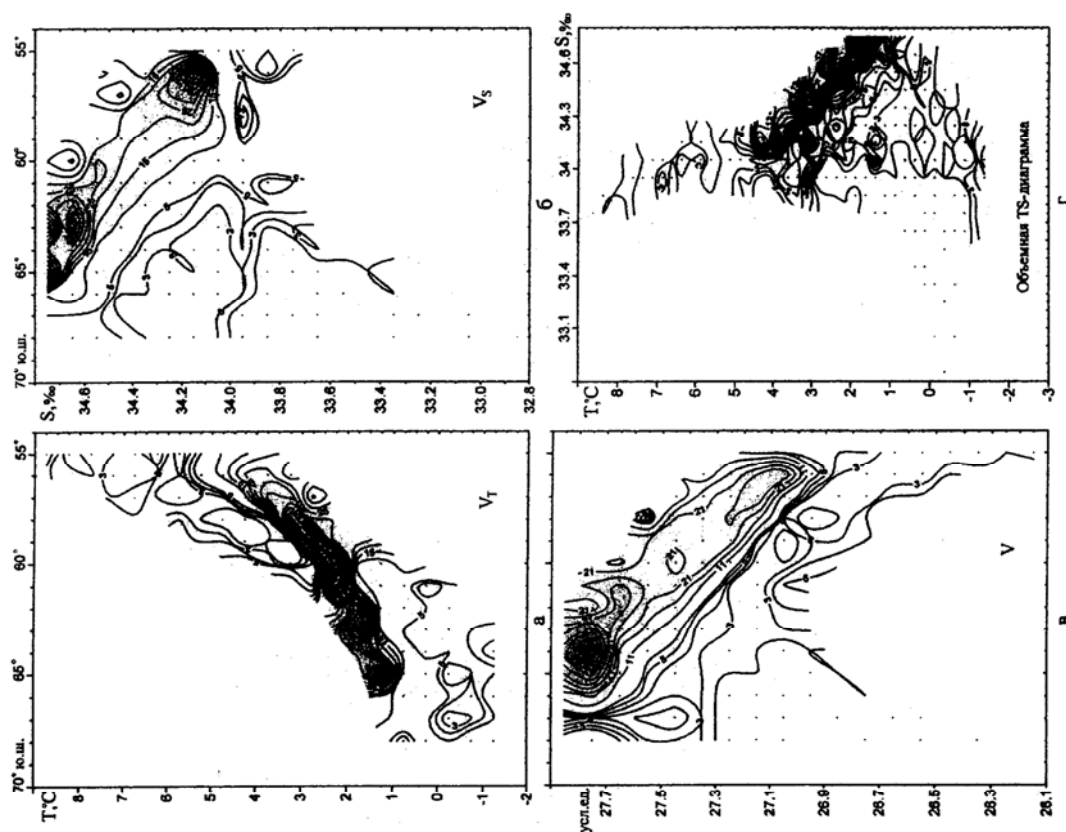
Анализ амплитуд сезонного хода суммарных объемов вод как функций градаций термохалинных характеристик (рис. 4) показывает следующее.

тарных объемов вод соответствует температуре около 4 °С. Пространственное положение изотермы 4 °С и распределение МГС на рис. 2 дают основание полагать, что максимум сезонной изменчивости вод с температурой 4 °С связан с вариациями САФ. Третий максимум (около 1,5 °С) обусловлен внутrigодовой изменчивостью объема прослойки холодных вод, расположенных под АЗВ в слое 300 — 400 м южнее 61° ю. ш. Наибольший объем этих вод отмечается в конце зимы (в августе), в период максимального развития термической конвекции и образования АЗВ. Максимум сезонной изменчивости объема типичен также для вод с температурой около -1,5 °С. Это относительно небольшая по объему, но наиболее холодная часть антарктической зимней водной массы, которая располагается южнее Границы континентальных вод (67° ю. ш.). Максимальный объем этой водной массы наблюдается в сентябре.

В поле солёности могут быть надежно выделены три максимума амплитуд внутrigодовой изменчивости объемов рассматриваемых водных масс. Первый экстремум имеют воды, солёность которых около 34,70 ‰, что соответствует халинному индексу ЦГВ. Увеличение сезонной изменчивости объемов вод наблюдается также в диапазоне солёности между 34,00 и 34,30 ‰ (солёность, близкая к солёности АПРВ). Данный максимум раздвоен. Один из пиков при солёности 34,10 ‰ характеризует изменчивость в верхней части АПРВ на глубине 100 — 150 м (рис. 2). Максимальный объем этой воды наблюдается в начале летнего прогрева (декабрь). Пик при солёности 34,25 ‰ характеризует изменчивость в нижней части АПРВ. Максимум объема этой воды наблюдается в январе. В целом наибольший объем АПРВ отмечается летом (рис. 4, б).

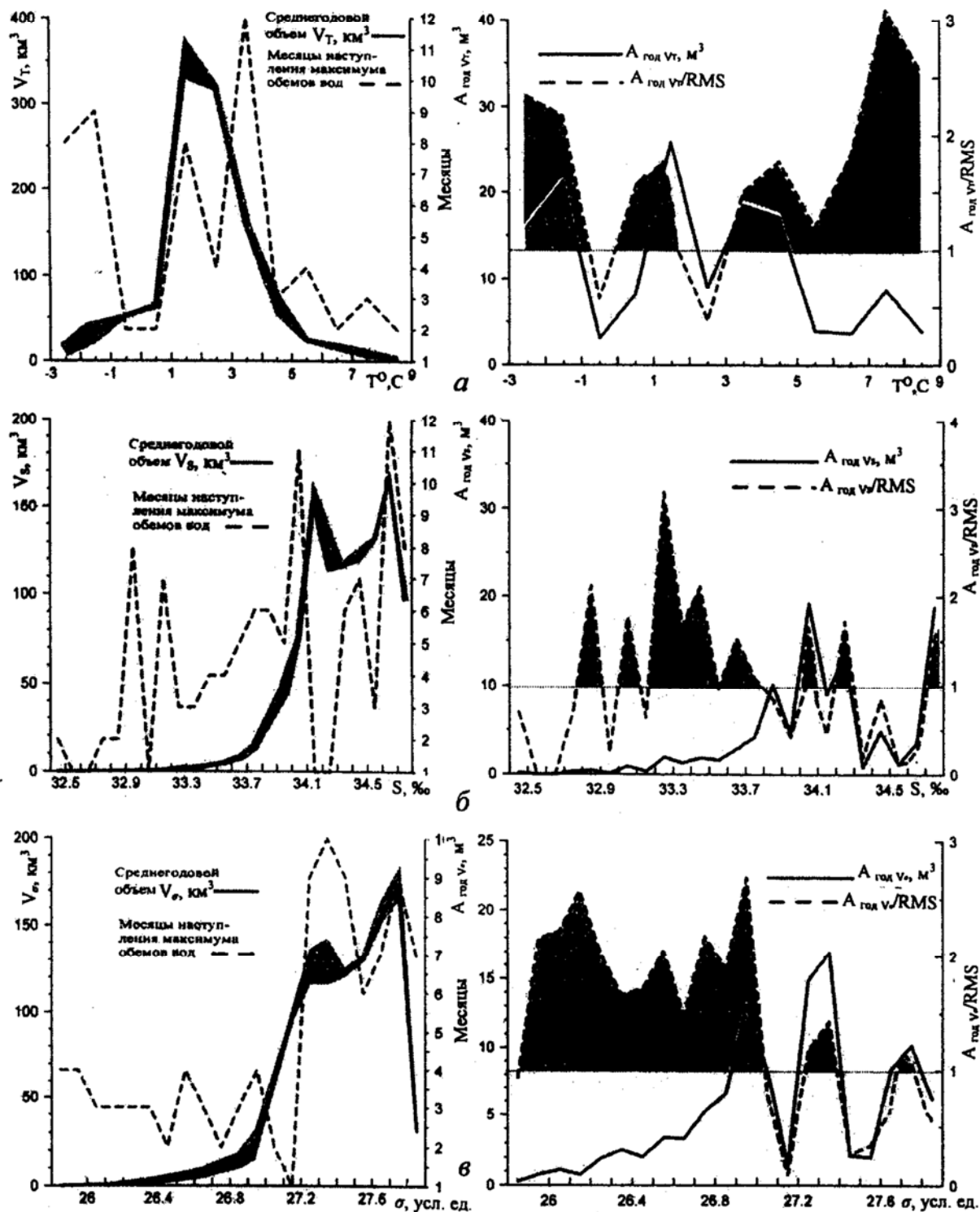
В поле плотности отмечаются два максимума амплитуд сезонных колебаний объемов вод, которые соответствуют плотности 27,3 и 26,95 усл. ед. Первый характерен для ядра АПРВ. Максимальный объем этих вод наблюдается в октябре. Пик при плотности 26,95 усл. ед. характеризует сезонные изменения поверхностных вод в северной части разреза, максимальный объем которых отмечается в апреле. В целом, независимо от положения на разрезе, воды минимальной плотности (<27,1 усл. ед.) образуются в конце лета — начале осени (февраль — апрель) (рис. 4, в).

На диаграммах повторяемости объемов вод в зависимости от параметра и широты было выделено только два ядра, соответствующих АПРВ и ЦГВ. Другие водные массы из-за малости объема в виде ядер практически не прослеживаются. Тем не менее от месяца к месяцу их объемы испытывают заметные изменения смещения по широте. В связи с этим параметры сезонной изменчивости объемов вод представляются более надежными при выявлении положения фронтальных разделов и позволяют более детально исследовать структуру водных масс в климатических термохалинных полях.



Р и с. 3. Распределение повторяемости элементарных объемов вод V , км^3 в зависимости от широты и диапазонов температуры T (а), солёности S (б), условной плотности σ (в) и объемно-статистическая T, S -диаграмма (г) на разрезе через пролив Дрейка (69° з. д., январь)

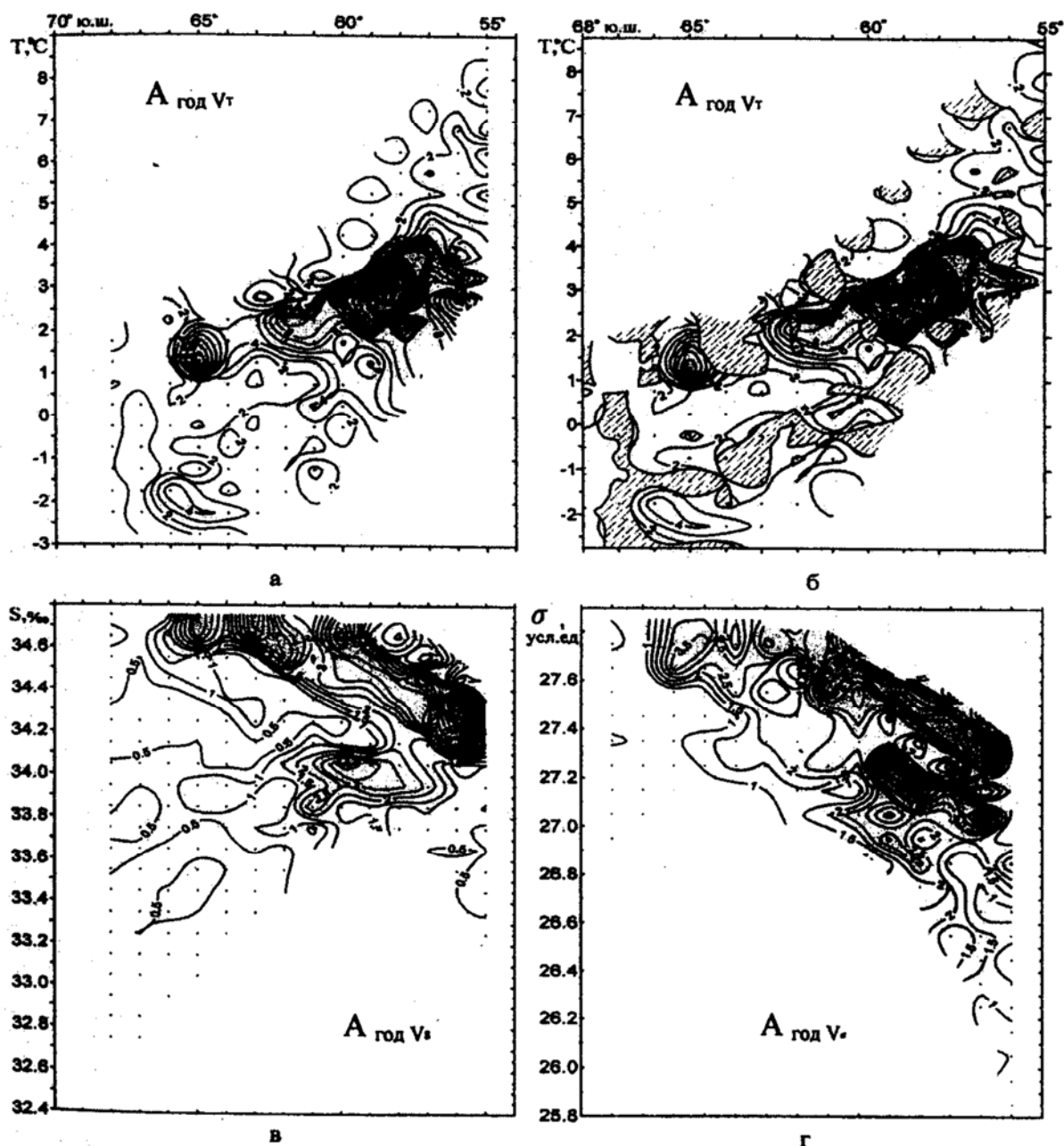
В поле температуры отчетливо видны четыре максимума сезонной изменчивости суммарных объемов (рис. 4, а). Первый пик характеризует сезонную изменчивость вод с температурой около 7,5 °С. Эти воды расположены в северной части пролива в слое 0 — 100 м. Наибольший объем этих вод наблюдается в начале осени Южного полушария (в марте), т. е. в конце периода летнего прогрева. Второй максимум амплитуды сезонного хода сумм элемен-



Р и с. 4. Сумма элементарных объемов вод V (заштрихована полоса максимальных внутригодовых отклонений) и месяц наступления их максимума (слева), а также амплитуда их годовых колебаний $A_{\text{год}}$ и ее отношение к остаточному среднему квадратичному отклонению RMS (справа) в зависимости от температуры (а), солёности (б) и плотности (в) (69°з. д.)

На рис. 5 показаны распределения амплитуды годовой гармоники повторяемости объемов вод как функции параметра и широты. На рисунке справа приводится пример оценки отношения годовой амплитуды $A_{\text{год}}$ к остаточному среднему квадратичному отклонению RMS , показывающий, что основная часть диаграммы построена по достоверным данным. Максимальная измен-

чивость в поле температуры отмечается севернее 60° ю. ш. Основное ядро, соответствующее водам с температурой около $2,5 - 3,5^\circ\text{C}$, располагается между 58 и 60° ю. ш. Судя по распределениям температуры, солёности и их меридиональных градиентов (рис. 2), оно характеризует сезонные изменения объема АПрВ севернее АПФ. В поле солёности максимальные изменения наблюдаются в окрестностях 56° ю. ш. для интервала солёности $34,30 - 34,40$ ‰. По данным разреза по солёности эти изменения происходят в нижней части АПрВ. Другое, более слабое ядро, наблюдается при солёности $34,00 - 34,10$ ‰. При этом оно смещено на юг относительно основного и располагается между 59 и 60° ю. ш. Как и в случае суммарных объемов, эти изменения происходят в верхней части АПрВ к северу от АПФ. Отметим, что значения солёности в ядре АПрВ ($34,15 - 34,20$ ‰) являются промежуточными, при которых наблюдается наибольшая сезонная изменчивость.



Р и с. 5. Распределение амплитуды годовой гармонической повторяемости элементарных объемов вод V как функции широты, температуры (а), (б — заштрихованы области, где $A_{\text{год } V_T} < \text{RMS}$), солёности (в) и плотности (г) (69° з. д.)

Интенсивные сезонные изменения в поле температуры наблюдаются также в окрестностях 65° ю. ш. у границы материкового шельфа, где располагается прибрежная фронтальная зона или Граница континентальных вод. Ядро высоких значений годовой амплитуды изменения объемов отмечается для вод с температурой 1,0 — 1,5 °С. На этой же широте прослеживаются большие амплитуды изменения объемов вод высокой солености (>34,60 ‰). Воды такой солености располагаются над материковым склоном. Другой максимум амплитуды высокосолёных вод (>34,50 ‰) наблюдается в районе 62 — 63° ю. ш. Здесь, в слое примерно 200 — 600 м, отмечаются минимальные значения МГТ и максимум МГС. Третий максимум амплитуды высокосолёных вод (>34,60 ‰) прослеживается в районе 60° ю. ш. Его проявление можно объяснить внутригодовым смещением границы ЦГВ, которая в этой части разреза наблюдается на глубинах более 600 м. В целом зона перехода от АПрВ к ЦГВ характеризуется высокими значениями амплитуды годовой гармоники объемов вод в полях температуры, солености и плотности.

Заключение. На основе климатического массива гидрологических данных проанализирована структура основных водных масс в проливе Дрейка от берегов Антарктиды до о. Огненная Земля на разрезе вдоль 69° з. д. Выявлены закономерности сезонного цикла циркулярной глубинной, антарктической промежуточной, антарктической зимней водных масс и прибрежных вод на границах пролива. Показано, что механизм формирования поверхностных водных масс связан с сезонным ходом процессов выхолаживания — прогрева поверхности океана. Максимальный объем холодных вод отмечается зимой — весной, теплых — летом — осенью, что еще раз подтверждает концепцию о локальном механизме формирования поверхностных вод. Максимальная сезонная изменчивость объемов водных масс наблюдается в окрестностях крупномасштабных фронтов — Антарктического Полярного, Субантарктического и Границы континентальных вод. В пределах антарктической промежуточной водной массы отмечаются верхний и нижний максимумы изменчивости объемов вод, природа которых связана с изменчивостью Антарктического Полярного и Субантарктического фронтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суховей В.Ф. Изменчивость гидрологических условий Атлантического океана. — Киев: Наук. думка, 1977. — 215 с.
2. Дубравин В.Ф., Навроцкая С.Н. Поверхностные водные массы Тропической Атлантики // Океанология. — 1984. — 24, вып. 6. — С. 880 — 888.
3. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Стаднюк Т.И. Сезонная изменчивость водных масс верхнего 200-метрового слоя Тропической Атлантики. — Севастополь, 1996. — 35 с. — (Препринт / НАН Украины. МГИ).
4. Дубравин В.Ф. Поверхностные водные массы и формирование зон биологической продуктивности Атлантического океана. — С.-Пб.: Гидрометеиздат, 2001. — 116 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. — Washington, D.C.: National Oceanographic Data Center, Ocean Climate Laboratory, June, 1994.
7. Булгаков Н.П. Структура Субарктического фронта в северо-западной части Тихого океана // Океанологические исследования. — 1968. — № 19. — С. 70 — 93.

8. Артамонов Ю.В., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д. Фронты Атлантического сектора Южного океана (обзор литературы). — Севастополь, 1999. — 68 с. — (Препринт / НАН Украины. МГИ).
9. Богуславский С.Г., Беляков Ю.М. Особенности динамики вод Субантарктического промежуточного течения в Атлантике // Изв. АН СССР. ФАО. — 1966. — 2, № 10. — С. 1082 – 1088.
10. Саруханян Э.И., Смирнов Н.П. Водные массы и циркуляция Южного океана. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. — 288 с.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 20.03.03.
После доработки 02.04.03

ABSTRACT Based on monthly average thermohaline data, some regularities of a seasonal cycle in the thermohaline fields and water mass characteristics in the Drake Strait are investigated. Amplitude-phase parameters of seasonal fluctuations of the values under study are obtained and analyzed. Annual variations of volumes of main water masses of the strait are estimated on the quantitative level using a volumetric-statistical *T*, *S*-analysis. Possible mechanisms determining the considered phenomena in the Drake Strait are discussed.