

УДК 551.46

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ПРОЛИВА БРАНСФИЛДА В МАРТЕ 2002 ГОДА

Ю.В. Артамонов, А.С. Романов, Ю.Л. Внуков, А.А. Перов, И.И. Степура

*Морской гидрофизический институт, Севастополь,  
e-mail: [ocean@mhi2.sebastopol.ua](mailto:ocean@mhi2.sebastopol.ua)/Fax: 380(0692)444253*

**Реферат.** На основе гидрологических и гидрохимических данных, полученных в 7-й Украинской антарктической экспедиции в марте 2002 г., описаны циркуляция, структура водных масс, их пространственное распределение в западной части пролива Брансфилда и в лагуне вулканического о-ва Десеппен. Обсуждаются особенности образования Фронта моря Уэдделла в поверхностных и глубинных слоях. Проведен сравнительный анализ полученных данных с результатами других экспедиций. Показаны особенности термохалинной и гидрохимической структуры вод в лагуне о-ва Десеппен, характерные для начала осеннего сезона

**Результати океанографічних досліджень у західній частині протоки Брансфілда в березні 2002 року.** Ю.В. Артамонов, О.С. Романов, Ю.Л. Внуков, А.А. Перов, І.І. Степура

**Реферат.** На основі гідрологічних та гідрохімічних даних, отриманих у 7-й Українській антарктичній експедиції в березні 2002 р. описані циркуляція, структура водняних мас, їхній просторовий розподіл у західній частині протоки Брансфілда та в лагуні вулканічного острова Десеппен. Обговорюються особливості утворення Фронту моря Уедделла в поверхневих та глибинних шарах. Проведено порівняльний аналіз отриманих даних з результатами інших експедицій. Показано особливості термохалінної і гідрохімічної структури вод у лагуні острова Десеппен, характерні для початку осіннього сезону.

**Results of the Oceanographical Research at the Western Bransfield Strait during March 2002** by Yu. Artamonov, A. Romanov, Yu. Vnucov, A. Perov, I. Stepura

**Abstract.** On the basis of hydrological and hydrochemical data received during the Seventh Ukrainian Antarctic Expedition (7th UAE, March, 2002) the circulation, water mass structure and spatial distribution at the Western Bransfield Strait and in the lagoon of volcanic Deception Island are obtained. Formation of the Weddell Front of the surface and deep layers and its peculiarities are discussed. Comparison of received data with the results of the previous expeditions is made. Features of hydrological and separate variables of hydrochemical structure of the Deception Island lagoon in the beginning of autumn period are shown.

**Key words:** Weddell Front, Bransfield Strait, Deception Island, water mass structure, chemical variables.

### 1. Введение

В настоящей работе обсуждаются результаты океанографических исследований, проведенных в 7-й Украинской антарктической экспедиции. Эти исследования проводились в рамках программы "Исследования Украины в Антарктике" и национального проекта "Биоресурсы". Работы были направлены на оценку влияния гидрофизических факторов на формирование и распределение биологических объектов.

Океанографические работы выполнялись в западной части пролива Брансфилда. Здесь проходит один из важнейших путей миграции криля и формируется важная в промышленном отношении область. Взаимодействие вод морей Беллинсгаузена и Уэдделла в проливе Брансфилда создает в этом регионе чрезвычайно сложные гидрологические условия. Геострофические течения выносят молодь криля из шельфовых районов Антарктического полуострова в крупномасштабные ветви Антарктического циркумполярного течения, которые переносят криль далеко на восток в район Южных Оркнейских островов и далее к острову Южная Георгия (Афанасьев, Масленников, 1983; Булгаков та ін., 2001; Артамонов, 2002).

Исследования в лагуне о-ва Десеппен были проведены с целью выявления особенностей распределения гидрофизических и гидрохимических полей в летне-осенний

период в относительно небольшом замкнутом водоеме. Результаты, полученные на полигоне в западной части пролива Брансфилда показали, что глубоководные “ямы” с перепадом глубин от нескольких десятков до сотен метров, которыми изобилуют мелководье и шельф Антарктического полуострова, имеют свой собственный гидрологический и биологический режим. Вулканический о-в Десепшен имеет форму подковы с узким мелководным входом. Внутренняя лагуна диаметром около 5 миль имеет среднюю глубину около 100 метров, а максимальную – более 200 метров. Лагуна о-ва Десепшен является идеальной природной моделью процессов, происходящих в таких “ямах”.

Промысловые и рыбопоисковые экспедиции, проведенные ранее в проливе Брансфилда, преследовали, главным образом, рыбохозяйственные цели. Полученные в них данные не охватывают всего спектра пространственно-временной изменчивости гидрологических процессов. Полученные новые данные существенно расширяют экспериментальную базу для решения задач промыслового прогнозирования.

## 2. Материалы и методика

Гидролого-гидрохимическая съемка в западной части пролива Брансфилда была выполнена с 08.03 по 17.03 2002 года и состояла из 42 станций. 21.03 - 22.03.2002 исследования были продолжены в лагуне вулканического о-ва Десепшен. Здесь было выполнено 15 станций с комплексом гидрологических и гидрохимических измерений. Для работы на океанографических станциях использовался зондирующий комплекс “ШИК-2” с каналами температуры, электропроводности, растворенного кислорода и автоматической кассетой из 10 однолитровых батометров для отбора проб на гидрохимические анализы. Растворенный кислород, фосфаты, кремний, pH и щелочность определялись непосредственно на борту судна, сразу же после отбора проб. Анализы проводились по методикам, рекомендованным для морских научных учреждений (Методы, 1983). Подробная информация о точности используемой аппаратуры, а также сведения о поверке приборов приводятся в отчете отряда океанографии (Отчет, 2002). Схемы расположения станций на полигоне в проливе Брансфилда и в лагуне о-ва Десепшен представлены на рис. 1 а, б.

## 3. Обсуждение результатов

Анализ вертикального и горизонтального распределений температуры и солёности на полигоне в проливе Брансфилда позволяет разделить всю акваторию исследований на два участка. На западе, северо-западе полигона располагаются воды Антарктической структуры. Вертикальные профили температуры в этой зоне имеют подповерхностный минимум на глубинах от 75 до 150 м, который связан с Антарктической зимней водной массой (АЗВ) (Саруханян и др., 1986). В верхнем 150-метровом слое воды антарктической структуры имеют более высокую температуру, низкую солёность и обеднены фосфатами и кремнием (рис. 1 в-е, 2 а-в, 3 б, в, д, е, з, и). Ниже, на горизонтах 300-500 метров, располагается глубинный максимум температуры, а под ним, на горизонтах 500-700 метров, – глубинный максимум солёности. Эти максимумы характерны для Циркумполярной глубинной водной массы (ЦГВМ) (Саруханян и др., 1986). Местоположение потока Циркумполярной глубинной воды хорошо прослеживается по областям пониженного содержания кислорода (рис. 4 г, ж). Областям минимума кислорода соответствуют, как правило, области с повышенным содержанием фосфатов и кремнекислоты (рис. 4 д, е, з, и).

В юго-восточной части полигона наблюдается качественно иная структура вод. Подповерхностный минимум температуры и глубинный максимум солёности отсутствуют. Верхний квазиоднородный слой (0-30 м) подстилается относительно тонким слоем резких вертикальных градиентов по температуре и солёности, после чего температура медленно уменьшается с глубиной, а солёность увеличивается. На некоторых станциях ниже слоя скачка солёность с увеличением глубины остается практически постоянной. Такая структура типична для глубоководной части пролива Брансфилда и сохраняется во впадинах, отрезанных от

основной части пролива малыи глубинами. Механизмы формирования вод на глубине в проливе и близлежащих впадинах аналогичны. Основным из них считается зимняя конвекция в период выхолаживания и образования льдов, что обуславливает повышенную соленость глубинных вод (Артамонов, 2002).

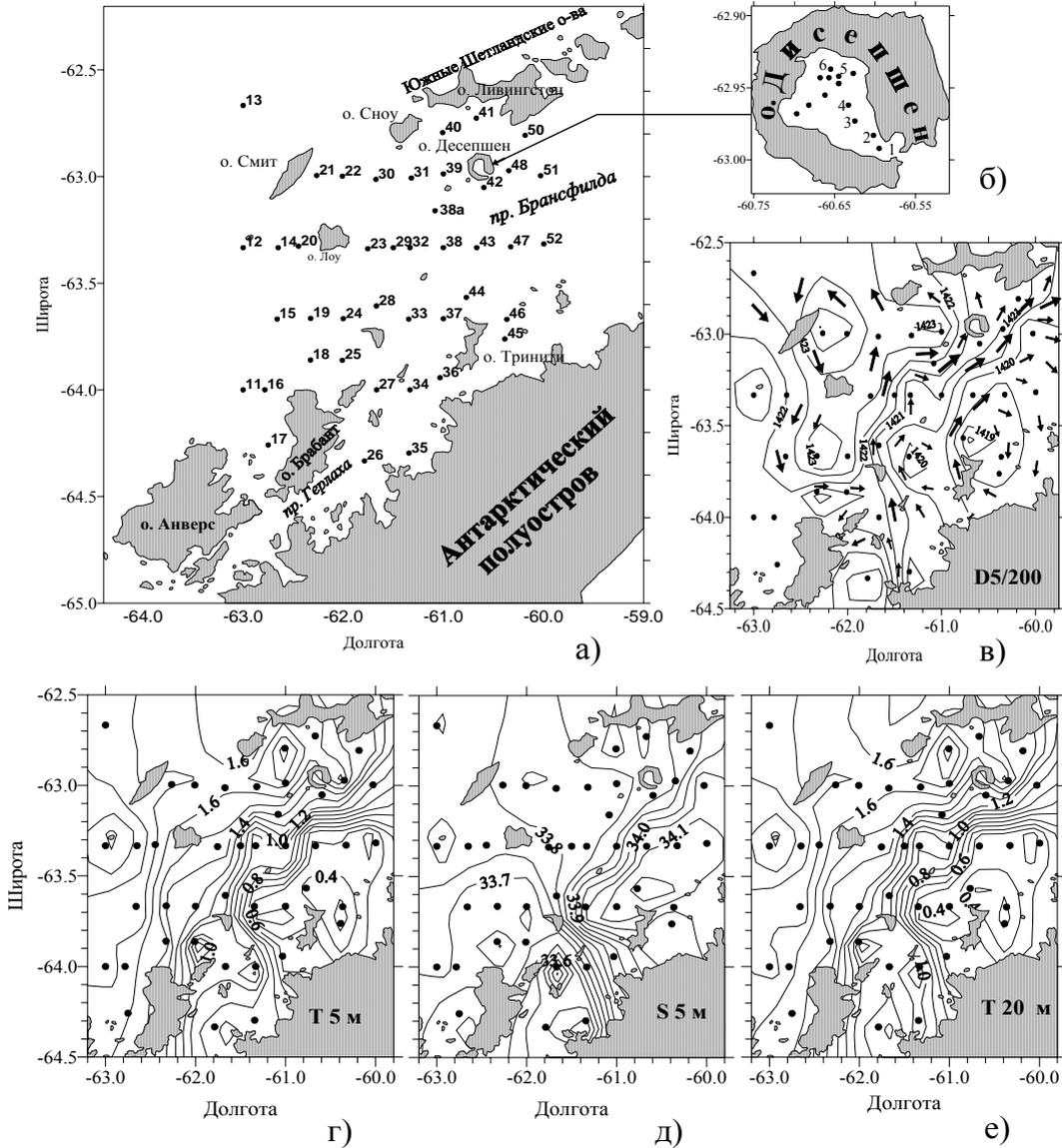


Рис. 1. Положение гидрологических станций на полигоне в западной части пролива Брансфилда [8-18.03.2002 г.] (а) и в лагуне о-ва Десеппен [21-22.03.2002] (б) и распределение динамических высот [5/200] (в), температуры (г, е) и солености (д) на горизонтах 5 и 20 м.

Между двумя структурными зонами прослеживается фронт, который хорошо выражен в полях температуры, солености, динамических высот и некоторых гидрохимических характеристик. Мы идентифицируем этот фронт как западный участок Фронта моря Уэдделла (ФМУ) (Peterson, Stramma, 1991), расположенного восточнее полигона. ФМУ прослеживается через весь полигон от шельфа Антарктического полуострова западнее о-ва Тринити до южного шельфа о-ва Ливингстон. Основной геострофический поток направлен на северо-восток вдоль

ФМУ (рис.1, в). При этом справа от потока формируется циклонический круговорот. Этот круговорот был зафиксирован ранее (Niiler et al., 1991; Garcia et al., 2002; Gomis et al., 2002). Одна часть вод направляется в проливы между островами Ливингстон, Сноу и Смит, другая – в северную часть пролива Брансфилда, восточнее о-ва Десепшен. В западной части полигона отмечается поток вод из пролива Дрейка. Таким образом, полученная схема циркуляции вод полностью подтверждает существующее представление о выносе воды с мелководья, восточнее о-ва Брандта, в пролив Брансфилда и на северную окраину Южных Шетландских островов в Южную ветвь Антарктического циркумполярного течения (Булгаков та ин., 2001).

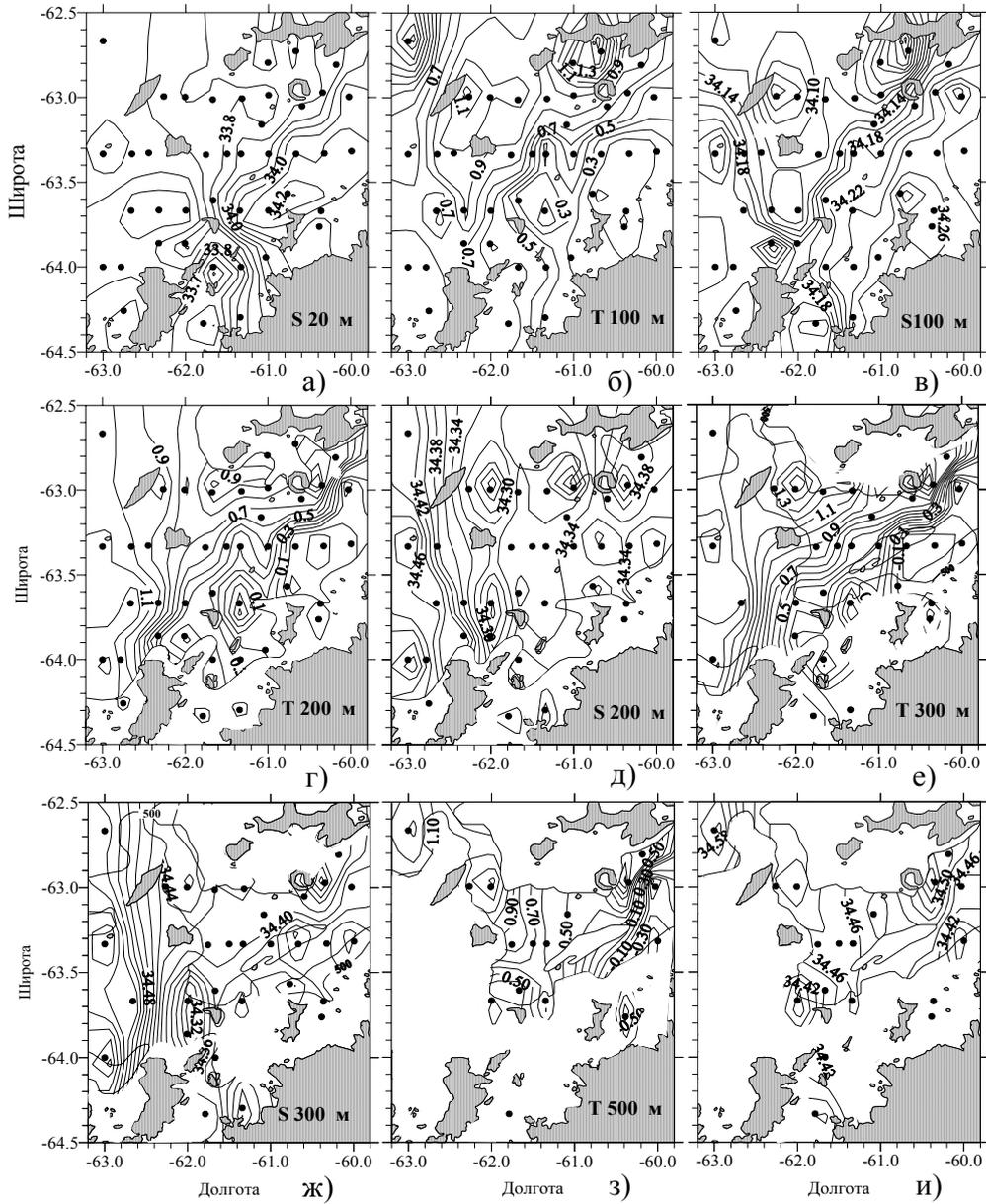


Рис. 2. Распределение температуры (б, г, е, з) и солёности (а, в, д, ж, и) на горизонтах 20 м (а), 100 м (б, в), 200 м (г, д), 300 м (е, ж) и 500 м (з, и).

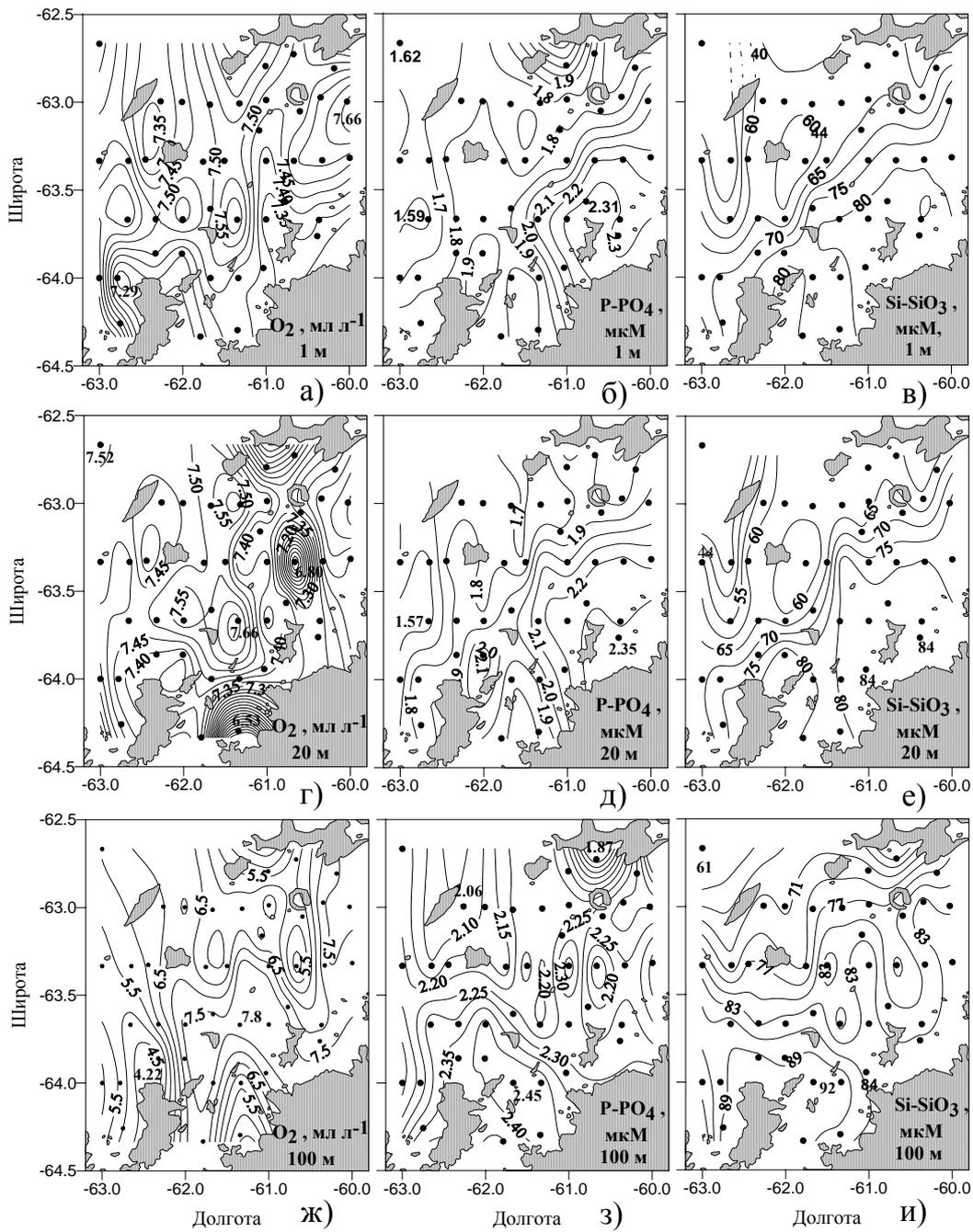


Рис. 3. Распределение кислорода (а, г, ж), фосфатов (б, д, з) и кремния (в, е, и) на горизонтах 1 м (а, б, в), 20 м (г, д, е) и 100 м (ж, з, и).

ФМУ отделяет высокосоленные и холодные воды моря Уэдделла, расположенные в верхнем слое до глубины 100 м, от распресненных и более теплых вод моря Беллинсгаузена (рис. 1 г-е; рис. 2 а-в). В поле гидрохимических характеристик он наиболее четко прослеживается по распределению фосфатов и кремния в верхнем квазиоднородном слое (рис. 3 б, в, д, е). Перепады значений температуры, солености, фосфатов и кремния через фронт составили соответственно 1°C, 0,4‰, 0,5 мкМ и 20 мкМ.

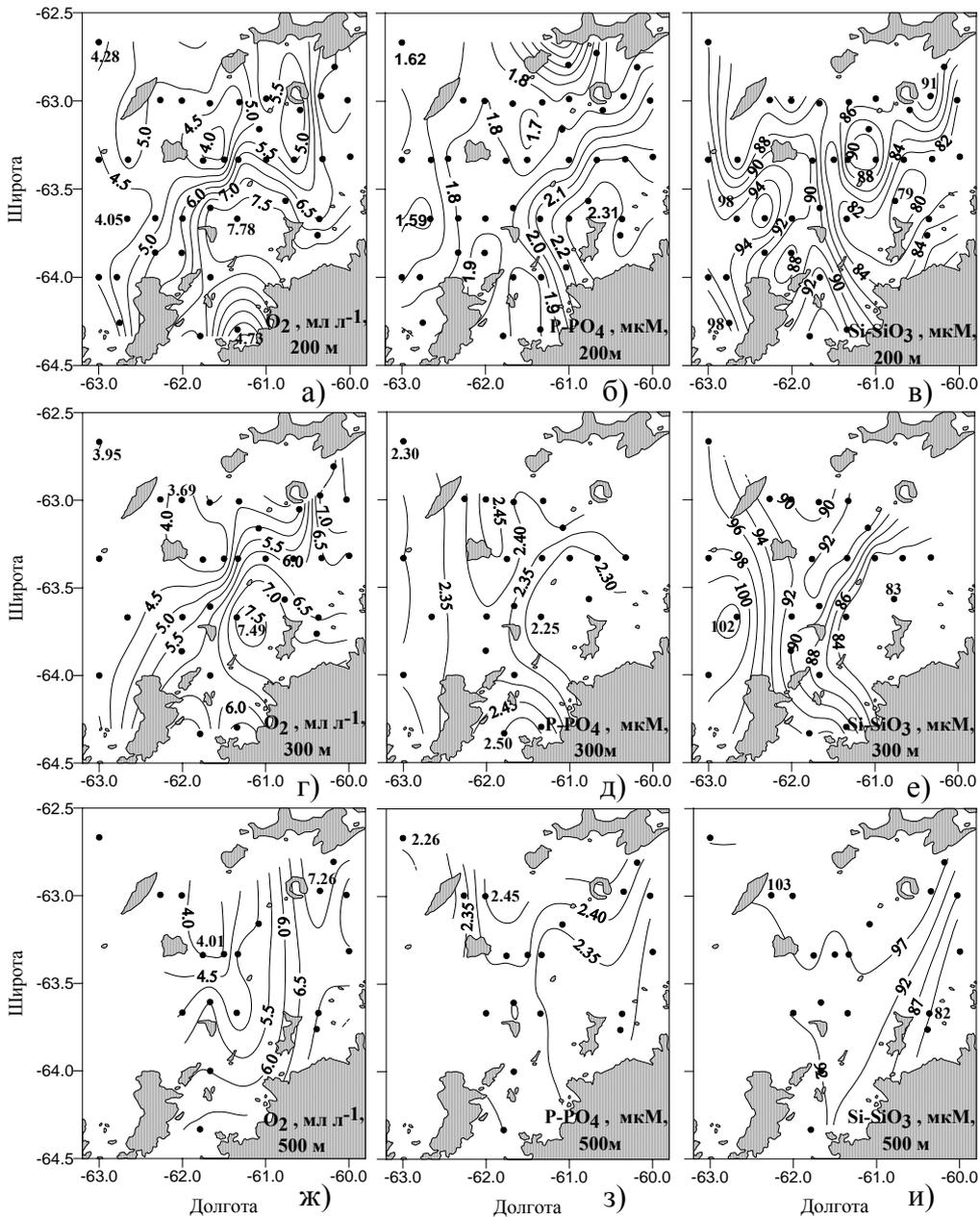


Рис. 4. Распределение кислорода (а, г, ж), фосфатов (б, д, з) и кремния (в, е, и) на горизонтах 200 м (а, б, в), 300 м (г, д, е) и 500 м (ж, з, и).

Необходимо отметить, что подробные синоптические съемки в этом районе крайне редки. Ранее здесь проводились эпизодические наблюдения на отдельных батометрических разрезах и глубоководных станциях, а также батиграфные измерения до 200 м (Артамонов, 2002). Известны лишь две экспедиции, в которых выполнялись подробные съемки в западной части пролива Брансфилда. Первая экспедиция проводилась американскими исследователями в летне-осенний сезон 1987 г. В результате был зафиксирован сходный фронтальный раздел в пределах верхнего 200-метрового слоя (Niiler et al., 1991). Из-за относительно небольшой

глубины измерений глубинная структура вод не рассматривалась. Вторая экспедиция выполнена испанскими исследователями летом 1995 г. (García et al., 2002). К сожалению, в доступных авторам публикациях Фронт моря Уэдделла в западной части пролива Брансфилда подробно не описан.

В настоящей экспедиции расстояние между станциями было менее 20 миль, а зондирования проводились на большей части станций до дна, что позволило детально рассмотреть структуру Фронта моря Уэдделла. Выявлено, что в верхнем 100 метровом слое фронт имеет более сложную структуру, чем представлялось ранее. Севернее острова Брабант, формируется вторая ветвь фронта, которая образуется между наиболее пресными для рассматриваемого региона и относительно холодными шельфовыми водами, образующимися к востоку от о-ва Брабант в проливе Герлаха, и более теплыми водами моря Беллингаузена. С глубиной положение основного фронта в поле температуры меняется. Ось фронта смещается к северо-западу, при этом меняется его гидрологическая структура. В поле солёности на глубине 100 метров прослеживается “язык” относительно распресненных вод, поступающих из пролива Дрейка (рис. 2 в). Эти воды менее богаты кислородом, фосфатами и кремнием (рис. 3 ж-и). Таким образом, на этой глубине ФМУ образуется в результате взаимодействия преимущественно вод, поступающих из пролива Дрейка и вод моря Уэдделла. На западе воды пролива Дрейка отделяются от вод моря Беллингаузена фронтальным разделом, хорошо прослеживаемым в поле солёности (рис. 2 в). Относительно высокая солёность вод моря Беллингаузена в подповерхностном слое объясняется тем, что летом эти воды сохраняют высокий солезапас, накопленный в зимний сезон, когда интенсивно образуется лед. Интересной особенностью вертикальной структуры области, расположенной с южной стороны от ФМУ, является слой промежуточного максимума кислорода, выявленный по данным канала кислорода. Его толщина с концентрациями более 7,7 мл/л варьирует от 25 до 150 м. При среднем насыщении поверхностного слоя всего полигона на 95% слой максимума насыщен кислородом на 96-98%. Распределение этой воды по площади полигона примерно совпадает с областью содержания кислорода более 7,5 мл/л (рис. 3 ж). Наиболее мощным этот слой был на ст. 33. Температура вод кислородного максимума на этой станции менялась от 0,14 до -0,37°С. На ст. 24 слой промежуточного максимума кислорода соответствовал более теплой воде (0,7-0,8°С). Образование таких структур связано с опусканием поверхностных вод вдоль континентального шельфа и многочисленных островных шельфовых зон.

На горизонте 200 м контрасты по солёности в проливе Брансфилда ослабевают. ФМУ прослеживается по высоким горизонтальным градиентам в поле температуры (рис. 2 г) и частично – в поле кислорода. Горизонтальный градиент по кислороду между станциями 23 и 32, расположенными по разные стороны фронта, достигает почти 2 мл/л (рис. 4 а). Тем не менее, фронт на границе пролива и западной части моря Беллингаузена сохраняется (рис. 2 д). Влияние вод моря Беллингаузена на этой глубине заметно по пониженным концентрациям кислорода и фосфатов и более высокому содержанию кремния (рис. 4 а-в).

Глубже 200 метров фронтальный раздел формируется в основном за счет поступления в пролив Циркумполярной глубинной водной массы. ЦГВМ проникает в западную часть пролива Брансфилда через проход (глубиной более 500 м) между островами Смит и Сноу. На горизонтах 300 – 500 м этот процесс прослеживается по распределениям температуры и солёности (Рис. 2 е-и). Поступающая при этом теплая и соленая вода распространяется на восток. На восточной границе полигона она взаимодействует с глубинными водами пролива Брансфилда, образуя фронт. Этот фронт отличается от фронта в поверхностном слое противоположным по знаку градиентом по солёности. Положения поверхностного (ФМУ) и глубинного фронтов примерно совпадают, однако их взаимосвязь пока не совсем ясна.

В поле кислорода ЦГВМ выделяется в виде области пониженных (менее 5,0 мл/л) концентраций на северо-западе полигона на горизонтах 300 и 500 м (рис. 4 г, ж). По данным канала кислорода на станциях 22, 23 и 29 содержание кислорода в слое от 300 до 490 м было ниже 4,0 мл/л. В то же время, по сравнению с глубинными водами пролива Брансфилда ЦГВМ имеет более высокое содержание фосфатов и кремния (рис. 4 д, е, з, и). Перепады значений

температуры, солености, фосфатов и кремния через глубинный фронт меньше, чем на поверхности и соответственно составляют  $0,8^{\circ}\text{C}$ ,  $0,1\text{‰}$ ,  $0,15\text{ мкМ}$  и  $10\text{ мкМ}$ .

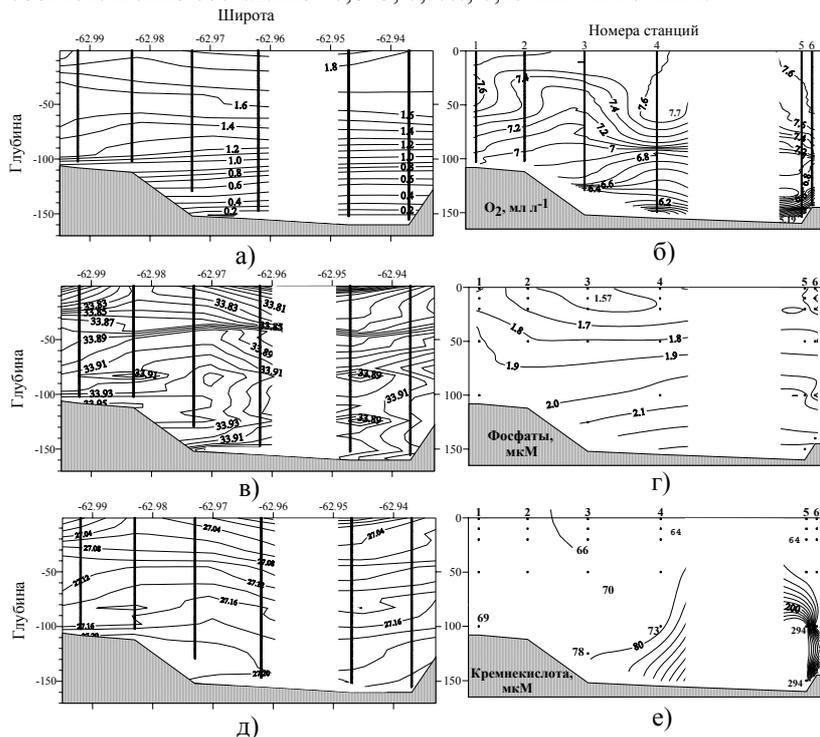


Рис. 5. Вертикальная структура полей температуры (а), солености (б), плотности (в), кислорода (г), фосфатов (д) и кремния (е) на разрезе 1 в лагуне о-ва Десеппшен.

Важным результатом проведенных исследований является обнаружение сильной межгодовой изменчивости Фронта моря Уэдделла. Сравнение результатов съемок, выполненных в марте 1987 и 2002 г., позволяет отметить различия в распределении температуры на горизонте 20 м. Ось фронта в 1987 г. проходила примерно между изотермами  $0^{\circ}$  и  $0,3^{\circ}\text{C}$ , а максимальное изменение температуры через фронт составляло около  $0,5^{\circ}\text{C}$ . В 2002 г. ось фронта проходила примерно между изотермами  $0,5^{\circ}$  и  $1,0^{\circ}\text{C}$ , а изменения температуры через фронт достигали почти  $1,5^{\circ}\text{C}$ . Низкие температуры в районе ФМУ в 1987 г. хорошо согласуются с отрицательной аномалией зимней температуры воздуха на ст. Академик Вернадский, тогда как зиму 2001-2002 гг., предшествующую исследованиям в 7-й УАЕ, нельзя отнести к аномально холодным. Можно предположить, что на межгодовом масштабе между температурой воды в зоне ФМУ и температурой воздуха на станции Академик Вернадский существует взаимосвязь.

Исследования в лагуне о-ва Десеппшен показали, что в северной части лагуны преобладал антициклонический характер циркуляции вод. Ближе к выходу из лагуны геострофические течения имели циклоническое направление. Справедливость сделанных заключений подтверждается соответствующими заглаблением и подъемом изотерм, изохалин и изопикн на разрезе вдоль лагуны (рис. 5 а-в). Несмотря на замкнутость водоема, температура воды внутри лагуны близка по своим значениям к температуре вод, окружающих остров. Температура воды во всем слое – положительная, при этом максимальные величины ( $1,6-1,8^{\circ}\text{C}$ ) наблюдались в приповерхностном слое. С глубиной температура уменьшалась и у дна на некоторых станциях падала почти до  $0^{\circ}$ .

В распределении солености наблюдались принципиальные отличия от окружающих остров океанических вод. Соленость воды на поверхности внутри лагуны была примерно на  $0,1-0,2\text{‰}$  ниже океанической. В водах вокруг острова наблюдалось заметное повышение

солености с глубиной, связанное с влиянием Циркумполярной глубинной водной массы. В лагуне соленость также увеличивалась с глубиной, однако не превышала 34,0‰ даже на максимальных глубинах. В восточной части лагуны наблюдался придонный максимум солености. Его происхождение связано с процессами зимнего ледообразования, когда соленость в лагуне повышается. Летом, в результате таяния льда, осадков и интенсивного ветрового перемешивания основной объем вод опресняется. Из-за неблагоприятных погодных условий нам не удалось выполнить гидрологические станции близко от берега. Поэтому прибрежные эффекты, связанные с таянием ледников и поступлением этих вод в лагуну не были выявлены. Однако факт их влияния на распределение подповерхностных вод в центральной части лагуны очевиден, поскольку на некоторых станциях у дна наблюдается уменьшение солености, которое совпадает с понижением температуры до значений, близких к 0°C. Таким образом, температура верхнего 50-100-метрового слоя лагуны, как и в открытом океане, формируется под влиянием процессов взаимодействия с атмосферой, тогда как в придонном слое лагуны сказывается влияние стока материковых вод. Этот процесс аналогичен механизму формирования склоновых вод в проливе Брансфилда. Формирование полей температуры и солености в промежуточных и глубинных слоях (глубже 100-150 метров) открытой части пролива происходит иначе, поскольку сюда поступает Циркумполярная глубинная водная масса.

По гидрохимическим параметрам воды лагуны о-ва Десепшен мало отличаются от окружающих остров вод пролива Брансфилда (рис. 5). В качестве отличия можно отметить пониженное в среднем на 0,1-0,15 ед. рН и повышенную примерно на 0,05 мг-экв/л щелочность в толще вод лагуны по сравнению с таким же слоем полигона. Содержание кислорода в поверхностном слое лагуны также повышено, но при этом оно не достигает нормального насыщения. С увеличением глубины концентрация кислорода уменьшается. Минимальное значение зафиксировано в придонном слое ст. 5 (5,65 мл/л, 70% от полного насыщения, горизонт 150 м). Концентрации фосфатов и кремния возрастают с глубиной. Неожиданным оказалось обнаружение на горизонтах 100 и 150 м ст. 5 аномально высокого содержания кремния (294 мкМ). Концентрацию 105 мкМ на горизонте 140 м на ст. 6 также можно считать повышенной. Средняя концентрация кремния для горизонта 150 м в окружающих остров водах пролива Брансфилда составляет 87 мкМ. К сожалению, из-за резкого ухудшения погодных условий повторное зондирование было выполнено с некоторым смещением от точки аномалии. Можно предположить, что в районе ст. 5, которая выполнена в самом глубоком месте лагуны, происходит подземная разгрузка вод, связанных с вулканическими породами действовавшего в недавнем прошлом вулкана.

#### 4. Заключение

В результате выполнения съемки в западной части пролива Брансфилда в марте 2002 г были получены новые данные о структуре фронтальной зоны между водами морей Уэдделла и Беллинсгаузена, определено ее пространственное положение. В поверхностных слоях ФМУ формируется в результате взаимодействия холодных и более соленых вод моря Уэдделла с более теплыми и распресненными водами моря Беллинсгаузена. На глубинах более 200 метров ФМУ является результатом взаимодействия теплой и соленой Циркумполярной глубинной водной массы с глубинными водами пролива Брансфилда, которые имеют пониженные значения температуры и солености по сравнению с ВЦГВ. Наблюдаемая схема геострофической циркуляции может способствовать выносу криля из мелководных районов западного шельфа Антарктического полуострова в крупномасштабные ветви Антарктического циркумполярного течения. Отмечены большие межгодовые вариации характеристик Фронта моря Уэдделла в западной части пролива Брансфилда.

В начале осеннего сезона структура вод в лагуне о-ва Десепшен сформировалась под влиянием нескольких факторов. Летний прогрев и таяние льда образовали поверхностный слой теплых и распресненных вод. В придонный слой поступали холодные и распресненные воды

тающего материкового льда. Кроме того, в нижнем слое наблюдались воды повышенной солености. Они формировались в зимний период, когда в лагуне активно образовывался лед.

### Литература

**Артамонов Ю.В.** Особенности гидрологической структуры Зоны слияния вод морей Уэдделла и Скотия летом южного полушария // Сб. "Системы контроля окружающей среды". – 2002. - С. 371-380.

**Артамонов Ю.В.** Отчет отряда океанографии о работах в 7-й УАЭ. -УАЦ.- 2002. -26 с.

**Афанасьев Б.В.,** Масленников В.В. Океанологические условия летом 1982 г. в южной части моря Скотия - в северной части моря Уэдделла // Препринт, ВНИРО, 1983. - 38 с.

**Булгаков М.П.,** Артамонов Ю.В., Ломакін П.Д. Циркуляція вод в районі північно-західного шельфа Антарктичного півострова та її вплив на розповсюдження криля // Доповіді НАНУ. - 2001. - № 5. - С.113-115.

**Методы** гидрохимических исследований океана. М.: Наука, 1983. - 145 с.

**Саруханян Э.И.,** Смирнов Н.П. Водные массы и циркуляция Южного океана, Л., Гидрометеиздат, 1986. -288 с.

**Peterson R.G.,** Stramma L. Upper-Level circulation in the South Atlantic Ocean // Prog. Oceanogr. - 1991. - V. 26. - P.1-73.

**Niiler P.P,** Amos A., Hu J-H. Water masses and 200 m relative geostrophic circulation in the western Bransfield Strait region // Deep Sea Res.- 1991.- V. 38, No 89. - P. 943-959.

**Garcia M.A.,** Castro C.G., Rios A. F. et al. Water masses and distribution of physico-chemical properties in the Western Bransfield Strait and Gerlache Strait during Austral summer 1995/1996 // Deep-Sea Res. – 2002. - II, 49. - P. 585-602.

**Gomis D.,** Garcia M.A., Lopes O. et al. Quasi-geostrophic 3D circulation and mass transport in the western Bransfield Strait during Austral summer 1995/96 // Deep-Sea Res. - 2002. - II, 49. - P. 603-621.