

УДК 551.465

**ПЕРВОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ХОЛОДНОГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ
НА ШЕЛЬФЕ АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОЛУОСТРОВА****И. П. Неверовский¹, Ю. И. Попов², В. Н. Сытов¹, А. С. Матыгин¹**

¹ Гидрометеорологический центр Черного и Азовского морей, 65009, Украина, г. Одесса, Французский бульвар, 89; e-mail: Never62@mail.ru

² Украинский научный центр экологии моря, 65009, Украина, г. Одесса, Французский бульвар, 89; e-mail: Yporov50@mail.ru

Реферат. Впервые по данным подробной океанографической съемки, проведенной в период 17-й Украинской антарктической экспедиции (2012–2013), исследована структура водных масс региона архипелага Аргентинские острова. В проливе Пенола наблюдалось летнее формирование трехслойной структуры вод, впервые обнаружен промежуточный холодный слой отрицательных температур. Этот слой разделяет относительно теплые и значительно более соленые глубинные воды от прогретых в летних условиях и распресненных поверхностных вод. Более высокая соленость глубинных вод не позволяет водам холодного промежуточного слоя опускаться на большие глубины, поэтому они распространяются в подповерхностных горизонтах. Летний антарктический холодный промежуточный слой (АХПС) определяется как слой отрицательных температур, в ядре которого температура ниже $-0,35$ °С. АХПС в проливе Пенола располагался в слое сезонного скачка плотности на глубинах 25–80 метров. Источниками генерации вод АХПС непосредственно в районах западного шельфа Антарктического полуострова являются многочисленные выводные ледники. Анализ объемно-статистических T, S-диаграмм показал существование переноса на акваторию Аргентинских островов промежуточно-глубинных вод из района залива Маргарет, расположенного к югу от архипелага.

Перше спостереження холодного проміжного шару на шельфі Антарктичного півострова.

І. П. Неверовський, Ю. І. Попов, В. М. Ситов, О. С. Матигін

Реферат. Структура водних мас регіону архіпелагу Аргентинські острови вперше досліджена за даними детальної океанографічної зйомки, яка була проведена в період 17-ї Української антарктичної експедиції (2012–2013). Літнє формування тришарової структури вод було спостережено в протоці Пенола, вперше був виявлений проміжний холодний шар негативних температур. Цей шар розділяє відносно теплі і значно більш солоні глибинні води від прогрітих в літніх умовах і розпріснених поверхневих вод. Більш висока солоність глибинних вод не дозволяє опускатися водам холодного проміжного шару на великі глибини, тому вони поширюються в підповерхневих горизонтах. Літній антарктичний холодний проміжний шар (АХПШ) визначається як шар негативних температур, в ядрі якого температура нижче $-0,35$ °С. АХПШ розташовувався в протоці Пенола в шарі сезонного стрибка щільності на глибинах 25–80 метрів. Вивідні льодовики є джерелами генерації вод АХПШ в районах західного шельфу Антарктичного півострова. Об'ємно-статистичний аналіз T, S-діаграм показав наявність перенесення на акваторію Аргентинських островів проміжно-глибинних вод з району затоки Маргарет, який розташований на південь від архіпелагу.

The first observations of the cold intermediate layer on shelf Antarctic peninsula

Neverovsky I. P., Popov Y. I., Sytov V. N. and Matygin A. S.

Abstract. The structure of the water masses in the region Argentine Islands archipelago was first investigated according to the data detailed oceanographic survey, which was conducted during the period of the 17th Ukrainian Antarctic Expedition (2012–2013). Formation of a three-layer structure of water masses in summer were observed in the Penola Strait, the cold intermediate layer of negative temperature was found for the first time. This layer separates relatively warm and significantly more salty deep-waters from the warmed up in summer conditions and freshened surface waters. Higher salinity of deep waters does not allow to go down of the cold waters of the intermediate layer on the greater depths, so they are spread in the subsurface horizons. Summer the Antarctic cold intermediate layer (ACIL) is defined as a layer of negative temperatures, the temperature in the core is lower than -0.35 °C. ACIL located in the Strait of Penola in a layer of seasonal jump in density at a depth of 25–80 meters. Outlet glaciers are the source of generation ACIL on western shelf of the areas Antarctic Peninsula. The volume-statistical analysis the T, S-diagrams showed the existence of transfer to the water area of Argentine islands of the intermediate-deep waters of the Bay Margaret, which is located to the south of the archipelago.

Key words: Antarctic Peninsula, water masses, shelf zone, the cold intermediate layer.

1. Введение

В летний период зимовки 17-й Украинской антарктической экспедиции 2012–2013 гг. впервые проведена масштабная гидрологическая съемка межостровной зоны Аргентинских островов и акватории пролива Пенола. Материалы съемки позволили получить новую информацию о возможных механизмах формирования, структуре и районах генерации водных масс региона архипелага. Значительный объем океанографических наблюдений был получен с использованием гидрофизического зонда с твердотельной памятью марки RBR-XR620 (Канада). Станции выполнялись до глубин 150 метров или до дна при меньшей глубине места. Вертикальное разрешение измерений температуры и солёности морских вод составляло 0,10,5 м. в зависимости от скорости погружения гидрозонда.

В период всей зимовки 2012–2013 гг. зондирования морских вод выполнялись с малого плавсредства в межостровной зоне Аргентинских островов. Особое внимание уделялось двум районам – проливу Мик (зимний сезон) и акватории северной якорной стоянки (летний сезон). Для получения внутригодового хода изменений термохалинного состояния водной толщи наблюдения в этих районах проводились по возможности в одних и тех же точках с недельной дискретностью. В зимний период года работы эпизодически проводились с ледового покрова. Всего было выполнено 23 рейдовые станции в проливе Мик и в районе якорной стоянки в период с 09.09.2012 по 12.02.2013.

С наступлением летнего полугодия 2012–2013 гг. появилась возможность проведения океанографических работ и в проливе Пенола. За летний период был выполнен полигон из 60 станций в межостровной зоне (13–15.02.2013) и три разреза в проливе Пенола: по меридиану $64^{\circ}10'$ з. д. (№ 1) – 10 ст. (22.01.2013), по широте $65^{\circ}15'$ ю. ш. (№ 2) – 13 ст. (24.01.2013), по широте $65^{\circ}13'$ ю. ш. (№ 3) – 10 ст. (01.03.2013).

Также были использованы материалы наблюдений исследовательского судна «Лоуренс Голд» (США), которые были произведены к северу и югу от региона Аргентинских островов в 2002 году и примерно в сроки съемок 2013 года пролива Пенола. Данные были любезно предоставлены украинским ученым американскими исследователями при заходе судна на УАС «Академик Вернадский» в 2003 году.

Анализ летних вертикальных распределений температуры и солёности в проливе Пенола позволил впервые для данного региона Антарктики выявить существование промежуточного холодного слоя. Антарктический холодный промежуточный слой (АХПС) разделяет относительно теплые и значительно более солёные глубинные воды и прогретые в летних условиях и распресненные поверхностные воды. Сведения о предшествующих наблюдениях АХПС в этом регионе отсутствуют. Параметры промежуточного холодного слоя можно рассматривать в качестве интегрального гидрологического показателя, характеризующего основные термодинамические процессы в океане. С одной стороны, параметры АХПС подвержены интенсивным внутригодовым (сезонным) и межгодовым вариациям, которые обусловлены изменчивостью характеристик поверхностной водной массы, вызванной сезонными изменениями температуры воздуха и морской воды, а также распресняющим влиянием талых ледниковых вод. С другой стороны, на АХПС оказывают влияние низкочастотные изменения, связанные с медленной трансформацией вертикальной структуры глубинных вод в климатическом масштабе. По этой причине изучение механизмов формирования и трансформации вод АХПС исключительно важно.

2. Вертикальная структура вод в проливе Пенола

Термохалинная структура вод района УАС формируется под воздействием физико-географических условий (рельеф дна и берегов, очень большая протяженность линии контакта вод моря с материковым и плавающим льдом и др.), солнечной инсоляции, синоптических ситуаций, ветрового режима, характера водообмена исследуемых акваторий, наличия ледяного покрова. Вертикальная структура водной толщи состоит из двух основных водных масс – поверхностной и придонной. В межостровной зоне их разделяют слои скачка температуры и солёности.

При анализе вертикальных распределений температуры и солёности в проливе Пенола, ширина которого 8–14 миль, прежде всего, следует обратить внимание на существовании промежуточного холодного слоя, разделяющего относительно теплые и значительно более солёные глубинные воды от прогретых в летних условиях и распресненных поверхностных вод (рис. 1, 2). Промежуточный холодный слой, лежащий над сезонным пикноклином, является слоем, похожим в вертикальном строении вод на аналогичную структуру над основным пикноклином Черного моря.

Черноморский холодный промежуточный слой (ЧХПС) является продуктом зимнего поступления вод из двух основных поверхностных источников: конвективно опускающихся плотных вод центральных областей моря и, в основном, из акватории северо-западного шельфа.

ХПС Черного моря является одним из наиболее интересных промежуточных слоев вод Мирового океана. В Черном море воды этого слоя формируются в условиях зимнего термодинамического взаимодействия в системе море-атмосфера. Он подстилает поверхностную водную массу и располагается над основным халоклином, отделяющим воды деятельного слоя моря от чрезвычайно однородных, относительно более теплых и значительно более солёных глубинных вод (рис. 3).

Поверхностная водная масса Черного моря подвержена значительному влиянию речных вод, внутри- и межгодовым температурным изменениям, типичным для умеренных широт. Глубинные воды являются продуктом медленной и длительной трансформации солёных и теплых вод Мраморного моря, поступающих через пролив Босфор в придонные слои Черного моря (Полонский, Попов, 2011).

Акватория архипелага Аргентинские острова, как и акватория Черного моря, относится к числу немногочисленных бассейнов Мирового океана, в которых летняя плотностная стратификация обусловлена, в основном, большими перепадами солёности между верхними распресненными и нижними солёными теплыми водами.

Значения температуры и солёности поверхностного слоя пролива Пенола летом 2013 года находились в диапазоне от $-1,1$ до $1,8$ °C и $31,0$ – $32,8$ ‰ соответственно.

АХПС вод пролива Пенола в 2013 году характеризовался отрицательными температурами и располагался в слое сезонного скачка солёности (плотности) в диапазоне глубин 25–80 метров. Температуры вод в ядре АХПС имели минимальные отрицательные значения на разрезах: от $-0,32$ до $-0,45$ °C (рис. 1а, 2а). АХПС во внутренней мелководной зоне района архипелага отсутствует.

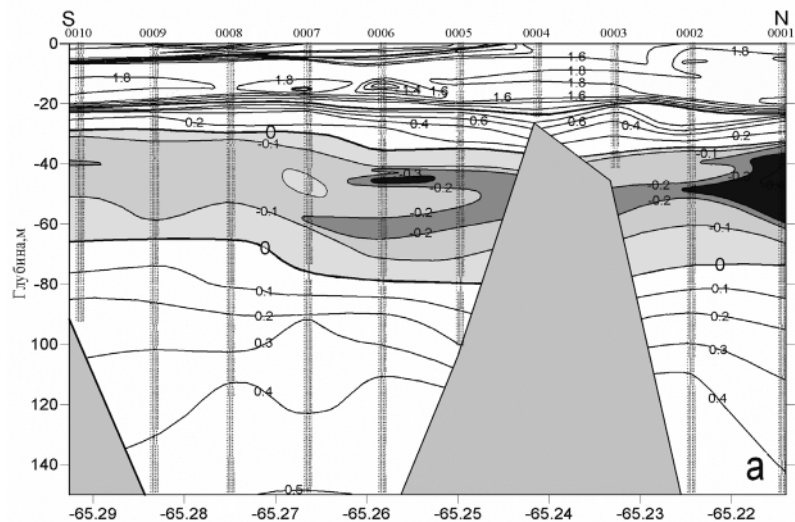


Рис.1(а). Распределение температуры (а) воды на вертикальном разрезе вдоль пролива Пенола по меридиану $64^{\circ}10'$ з.д. АХПС в пределах слоя отрицательных температур затенен.

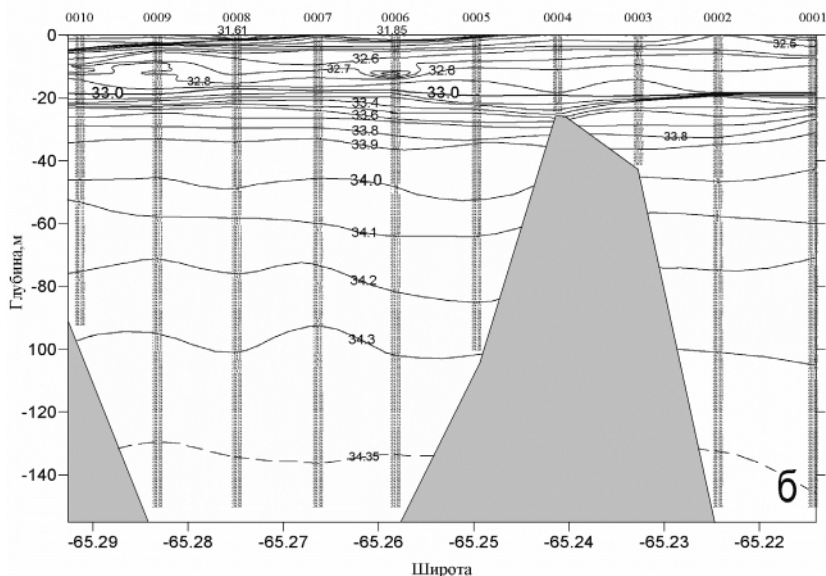


Рис.1(б). Распределение солёности (б) воды на вертикальном разрезе вдоль пролива Пенола по меридиану $64^{\circ}10'$ з.д. АХПС в пределах слоя отрицательных температур затенен.

Непосредственно под ХПС располагалась верхняя часть глубинных вод с положительными температурами $0,0 - 0,6^{\circ}\text{C}$, солёностью $34,2 - 34,6\text{‰}$.

Таким образом, можем сделать вывод, что в теплое полугодие в открытых районах пролива Пенола добавляется еще один промежуточный тип вод, разделяющий приповерхностные и глубинные водные массы, и резко отличающийся от них по своим термическим характеристикам.

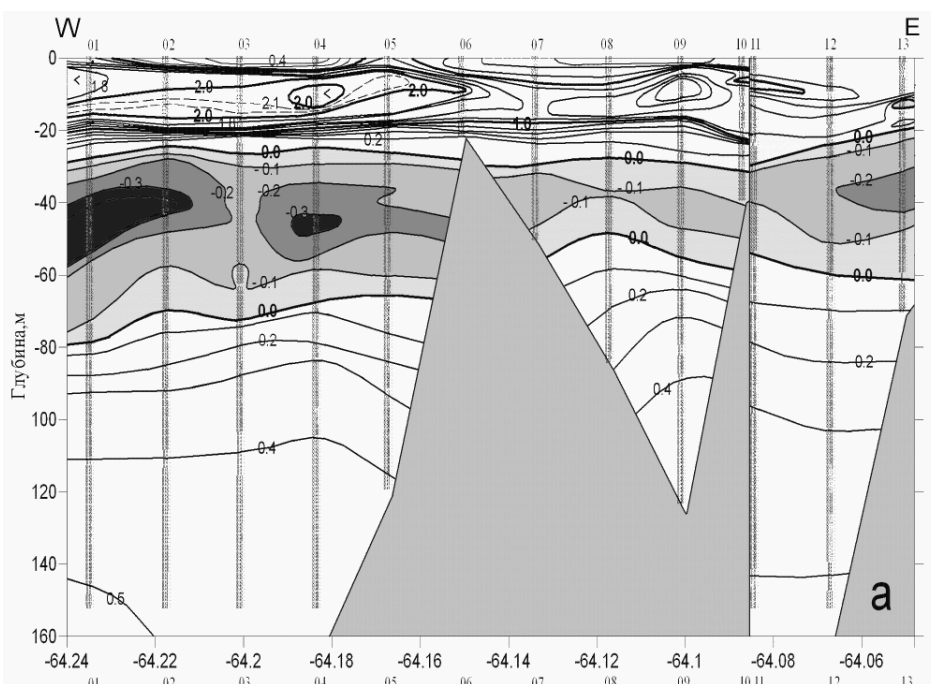


Рис. 2 (а). Распределение температуры (а) воды на вертикальном разрезе поперек пролива Пенола по параллели $65^{\circ}15'$ ю.ш. АХПС в пределах слоя отрицательных температур затенен.

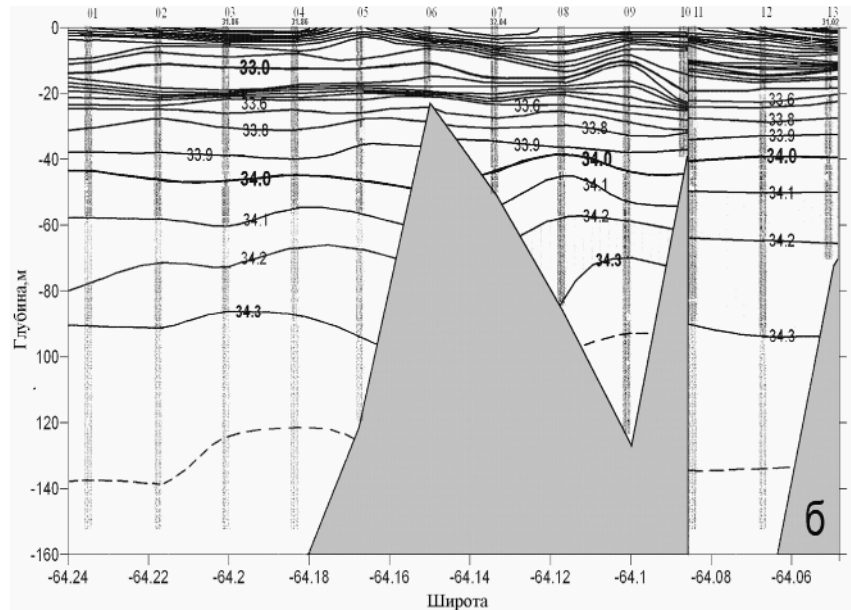


Рис. 2(б). Распределение солёности (б) воды на вертикальном разрезе поперек пролива Пенола по параллели 65° 15' ю.ш. АХПС в пределах слоя отрицательных температур затенен.

В холодное полугодие в результате вертикальной конвекции происходит активное перемешивание верхней толщи вод с уничтожением АХПС и вовлечением в перемешивание значительной части глубинных вод. Сведения о нижней глубине зимнего формирования однородного слоя на данный момент отсутствуют. Возможно, что в относительно неглубоком проливе Пенола зимнее перемешивание происходит до дна.

По данным измерений вертикальной структуры поля температуры в зимний период в проливе Мик (Неверовский и др., 2014) наблюдалась однородная масса вод ($-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$). Медленный прогрев вод поверхностного слоя в межостровной зоне происходил от $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сентябре до $-1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ в середине ноября. Процесс стратификации вод начался только с середины декабря (окончание антарктической весны).

Естественно предположить, что источниками генерации вод АХПС в шельфовых районах, могут быть многочисленные выводные ледники Антарктического полуострова с большим объемом талой пресной воды. Растекаясь в весенне-летний период по поверхности, эти воды под воздействием сильных ветров и поверхностного перемешивания могут заглубляться и, при дальнейшем летнем повышении температуры, создавать промежуточный слой.

Вследствие высокой солёности более плотная глубинная вода не позволяет холодным распресненным водным массам опускаться на большие глубины, и они адвективно распространяются в подповерхностном промежуточном слое в стороны от прибрежных источников формирования.

3. Объемно-статистический анализ водных масс

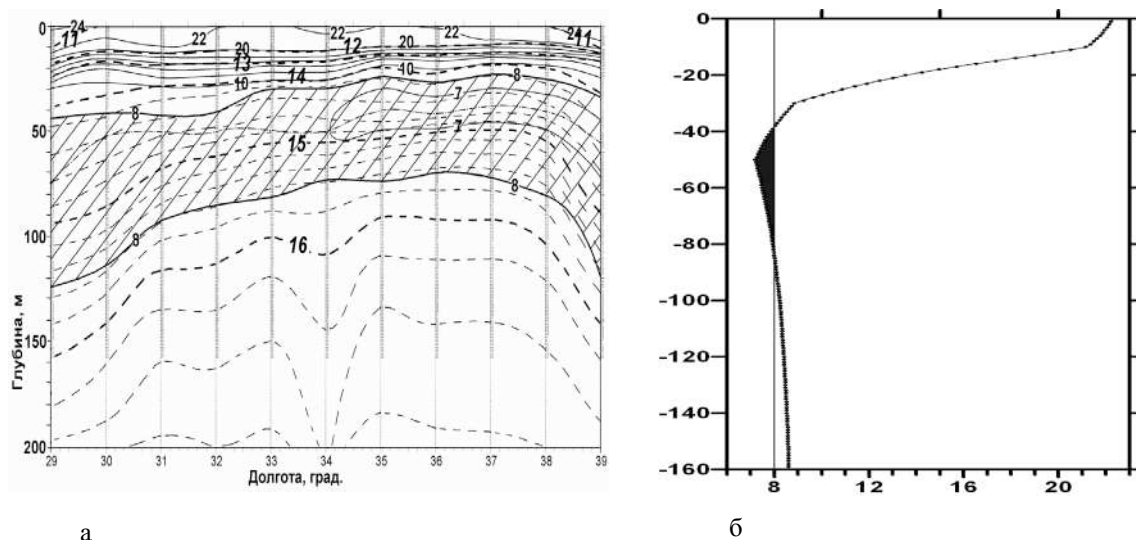
Изменчивость термohалинных характеристик вод приповерхностного слоя района архипелага «Аргентинские острова» существенно зависит от удаленности станций от источников холодных и пресных вод (айсбергов и берега, где происходит таяние снежного и ледового покровов). Эту изменчивость легко можно проследить на T, S-диаграммах, которые построены для всех разрезов в проливе Пенола (рис. 4–6).

На срединном меридиональном разрезе №1 диапазон изменения температуры в приповерхностном слое (5–20 м) на фоне изменения солёности минимален (рис. 4), а на широтных, подходящих вплотную к материковому склону Антарктического полуострова, где наблюдалась экстремально низкая температура ($-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), – максимальный (рис. 5 и 6).

Результаты наблюдений первой в истории исследований съемки пролива Пенола показывают, что характеристики летнего АХПС (Т, S-индексы ядер, толщина слоя и объемы вод) можно определять как характеристики слоя отрицательных температур.

На основании данных наблюдений американского исследовательского судна «Лоуренс Голд» рассмотрим вопрос о механизмах и районах формирования глубинных вод и вод ХПС в проливе Пенола. Температура глубинных вод на станциях пролива Пенола повышается ко дну (рис. 1, 2). По материалам ИС «Лоуренс Голд» такой характер изменений промежуточно-глубинных вод характерен для вод, расположенных южнее в заливе Маргарет (рис. 7) и совершенно не соответствует изменениям температуры в более северных водах – в районе пролива Брансфилд. В проливе Брансфилд температура глубинных вод понижается с глубиной. Их происхождение связано с глубоким западным внедрением вдоль Антарктического полуострова очень плотных промежуточно-глубинных вод моря Уэдделла (Артамонов и др., 2003). Это подтверждает южное происхождение глубинных и промежуточных вод в проливе Пенола.

Статистическим подтверждением этих выводов служит анализ совмещенных Т, S-диаграмм вод пролива Пенола и расположенного севернее пролива Брансфилд. В проливе Брансфилд присутствуют лишь незначительные следы промежуточно-глубинных вод рассматриваемой нами области. Очевидно, воды юго-западных секторов Антарктического полуострова в небольшом количестве достигают западных областей пролива Брансфилд. Соленость же основной массы промежуточных и глубинных вод пролива Брансфилд существенно выше (Артамонов и др., 2014).



а б
Рис. 3. Вертикальное распределение температуры и плотности воды на разрезе по 43°30' с. ш. (а) и вертикальный профиль температуры воды (°С) в открытой части Черного моря (б). Сплошные изолинии на рис. 1, а – изотермы (°С), пунктирные – изоопикны (кг/м³). ЧХПС заштрихован на рис. 3, а и зачернен на рис. 3, б. Разрез и профиль построены с использованием климатических данных для летнего периода (Полонский, Попов, 2011).

Аналогичный анализ совмещенных Т, S-характеристик объемно-статистических диаграмм вод пролива Пенола и вод залива Маргарет, расположенного несколько южнее архипелага «Аргентинские острова» (рис. 7), дает иную картину. Промежуточно-глубинные воды пролива Пенола по своим характеристикам соответствуют промежуточным водам залива Маргарет (70–110 м.), но, в среднем, приподняты относительно последних на 35–40 метров.

Активная атмосферная циклоническая деятельность вдоль западного побережья Антарктического полуострова вызывает частую повторяемость в исследуемом районе северо-восточных ветров, следовательно, активен дрейфовый перенос поверхностных вод в южных направлениях. В глубинных слоях должен существовать обратный, компенсационный перенос вод. Очевидно, именно такую ситуацию мы и наблюдаем по данным обобщенных нами наблюдений.

Выводы

Анализ летних вертикальных распределений температуры и солености в проливе Пенола позволил впервые для данного региона Антарктики выявить существование промежуточного холодного слоя, разделяющего относительно теплые и значительно более соленые глубинные воды от прогретых в летних условиях и распресненных поверхностных вод. Вертикальная плотностная структура вод, прежде всего за счет более высокой солености глубинных вод, не позволяет им опускаться на большие глубины, и они распространяются в подповерхностном промежуточном слое.

Антарктический промежуточный холодный слой, лежащий над сезонным пикноклином, похож в вертикальном строении на аналогичную структуру вод над основным пикноклином Черного моря.

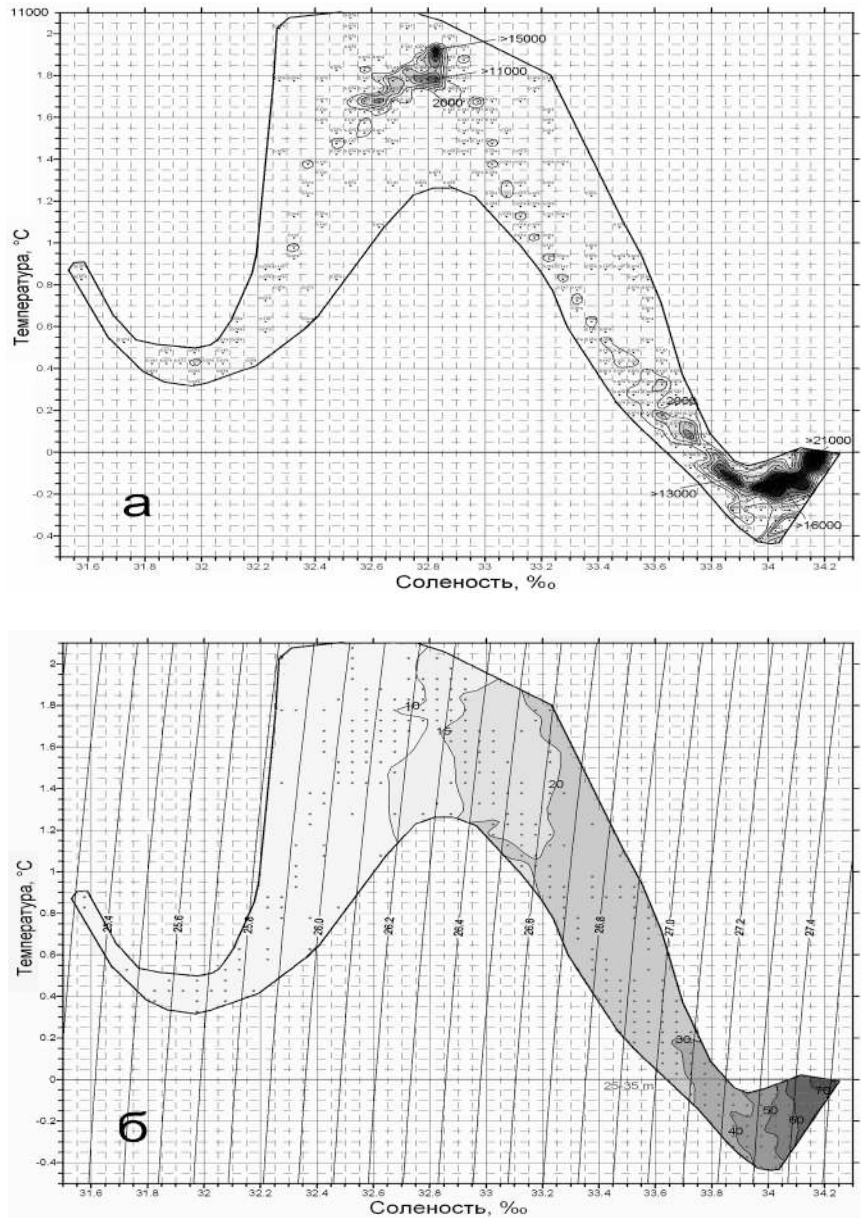


Рис. 4. Объемно-статистическая TS-диаграмма вод на меридиональном разрезе № 1 в проливе Пенола: а) объемы вод, усл.ед.; б) средневзвешенная глубина залегания вод, м. 24.01.2013 г.

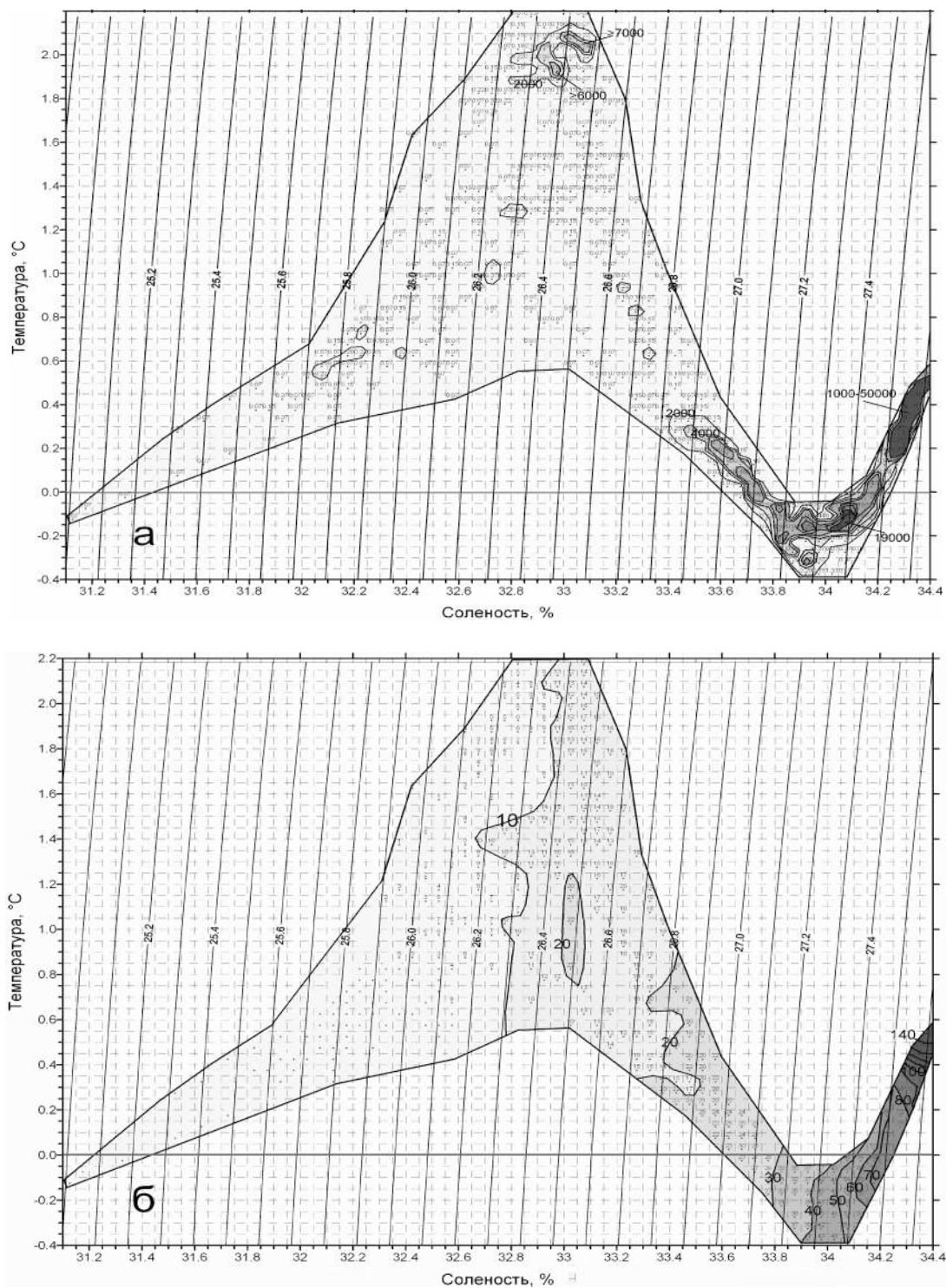


Рис. 5. Объемно-статистическая T, S-диаграмма вод на широтном разрезе № 2 в проливе Пенола:
 а) объемы вод, усл.ед., б) средневзвешенная глубина залегания вод, м. 24.01.2013 г.

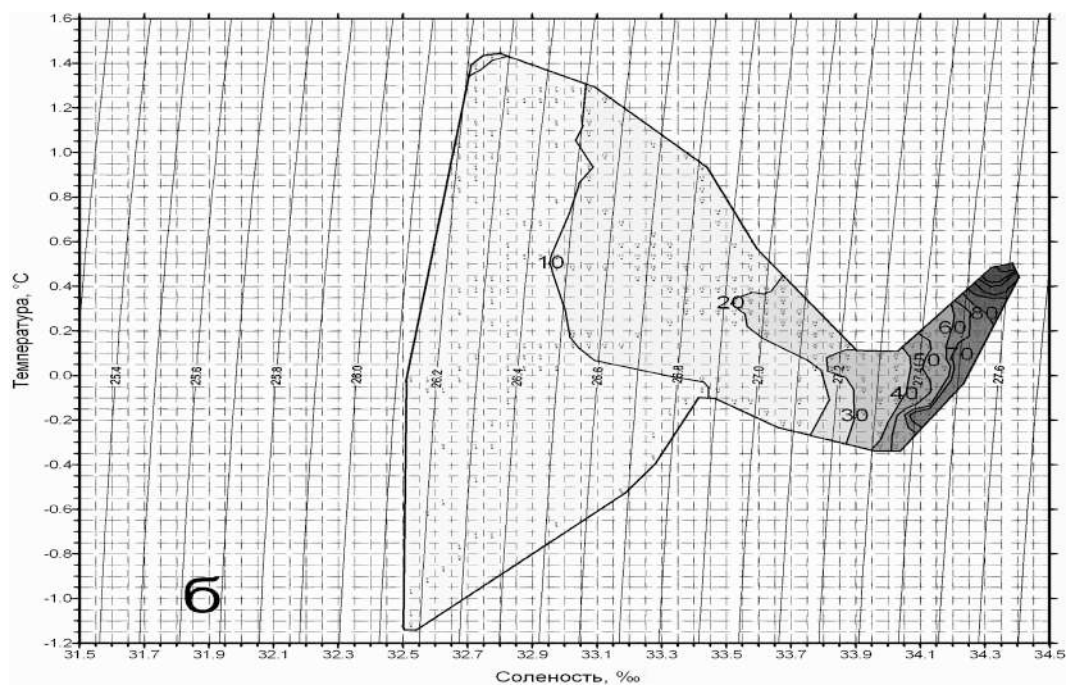
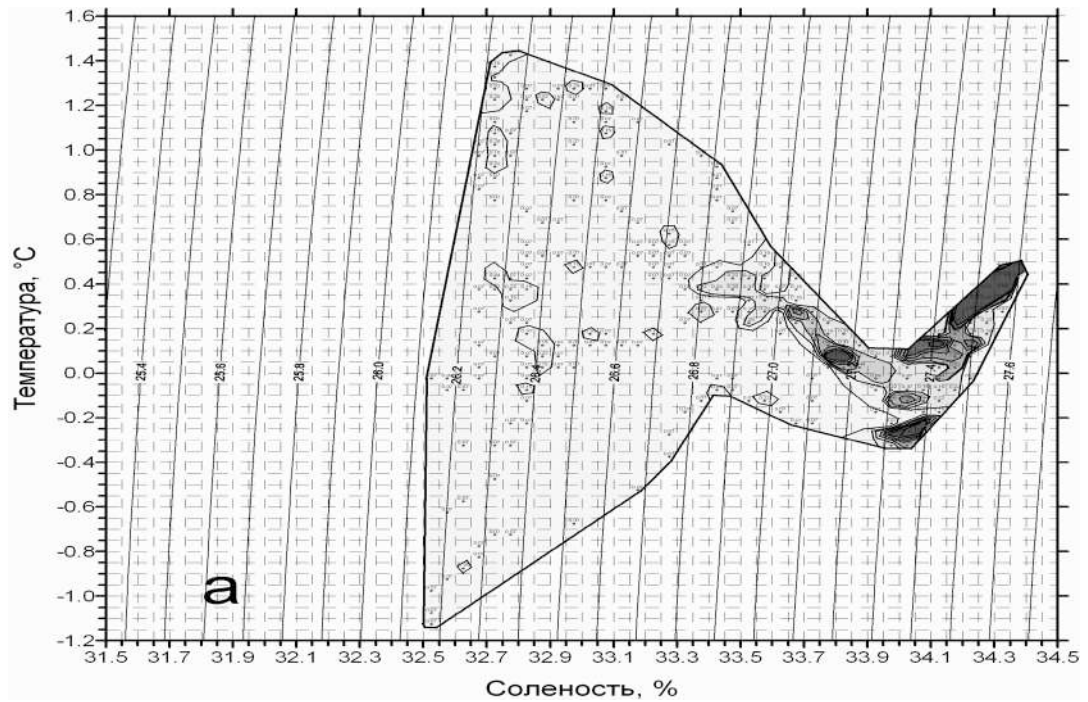


Рис. 6. Объемно статистическая T, S-диаграмма вод на широтном разрезе № 3 в проливе Пенола:
а) объемы вод, усл.ед.; б) средневзвешенная глубина залегания вод, м, 12.02.2013 г.

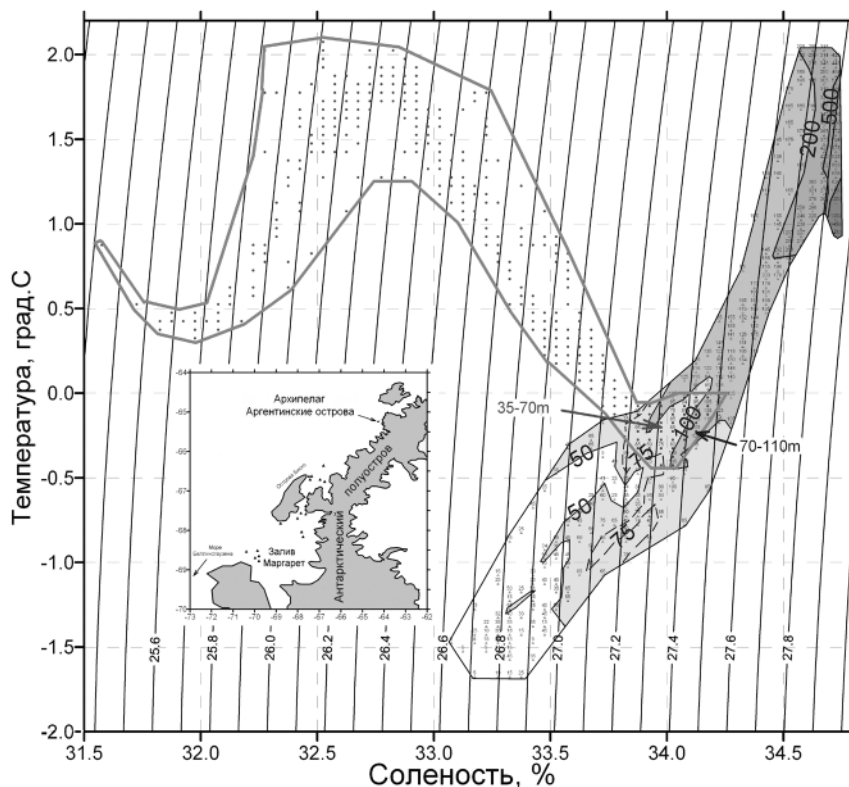


Рис. 7. Объемно-статистическая T, S-диаграмма вод залива Маргарет (средневзвешенная глубина залегания вод в метрах) на фоне контура распределения вод аналогичной диаграммы меридионального разреза через пролив Пенола (из рис. 4). На врезке приведена схема станций в районе залива Маргарет.

Результаты анализа материалов океанографической съемки пролива Пенола показывают, что летний антарктический ХПС можно определить как слой отрицательных температур, в ядре которого температура менее $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. АХПС вод пролива Пенола в 2013 году располагался в слое сезонного скачка плотности на глубинах 25–80 метров.

Источниками генерации вод АХПС шельфовой зоны являются многочисленные выводные ледники Антарктического полуострова. АХПС частично может быть и адвективного происхождения с тем же механизмом генерации в районах их формирования. Температура глубинных вод пролива Пенола в летний сезон повышается с глубиной. Такое вертикальное распределение температуры характерно для вод, расположенных южнее, в заливе Маргарет, и совершенно не соответствует вертикальной термохалинной структуре вод в расположенном к северу проливе Брансфилд. Это служит подтверждением южного происхождения глубинных вод в проливе Пенола

Литература

1. **Артамонов Ю. В.**, Романов А. С., Внуков Ю. Л. и др. Результаты океанографических исследований в западной части пролива Брансфилда в марте 2002 г. // Украинский Антарктический Журнал. – 2003. – № 1. – С. 7–16.
2. **Неверовский И. П.**, Попов Ю. И., Сытов В. Н. и др. Результаты океанографических исследований в Антарктике в области архипелага Аргентинских островов (включая пролив Пенола) в 2012–2013 гг. // Вестник Гидрометцентра Черного и Азовского морей. – Одесса. – 2014. – № 1 (16). – С.10–29.
3. **Полонский А. Б.**, Попов Ю. И. Условия формирования вод холодного промежуточного слоя Черного моря. // Морской гидрофизический институт НАН Украины. (Серия Современные проблемы океанологии, вып.8). – Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, – 2011. – 54 с.