

УДК 551.465(267)

ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАМКАХ II-го ЭТАПА ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УКРАИНЫ В АНТАРКТИКЕ

Ю.В. Артамонов

Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь, Украина

e-mail: Artam-ant@yandex.ru

Реферат. В работе представлены основные результаты океанографических исследований, полученные в рамках II-го этапа (2002–2008 гг.) Государственной программы исследований Украины в Антарктике. Отмечается, что на этом этапе при отсутствии морских экспедиций основное внимание уделялось проведению исследований на основе современных архивов гидрометеорологической информации. По этим данным исследованы внутригодовая изменчивость трендов температуры поверхности океана (ТПО) и корреляционные связи между индексом Южного колебания (ЮК) и аномалиями ТПО в Южном полушарии. На основе спутниковых и контактных измерений ТПО уточнена схема фронтов Южного океана, выявлены закономерности их сезонного цикла и особенности межгодовой изменчивости. Обобщены результаты попутных гидрометеорологических измерений, выполненных НЭС «Академик Фёдоров» по программе Международного Полярного Года 2007-2008. Исследованы сезонная и межгодовая изменчивость морских льдов различной сплочённости и корреляционные связи между изменчивостью сплочённости льдов, температуры воздуха в регионе Антарктического полуострова и индексами атмосферной циркуляции.

Океанографічні дослідження в рамках II-го етапу Державної програми досліджень України в Антарктиці. Ю.В. Артамонов.

Реферат. У роботі представлено основні результати океанографічних досліджень, отриманих у рамках II-го етапу (2002–2008 рр.) Державної програми досліджень України в Антарктиці. Відзначається, що на цьому етапі за відсутності морських експедицій основна увага приділялася проведенню досліджень на основі сучасних архівів гідрометеорологічної інформації. За цими даними досліджено внутрішньорічну мінливість трендів температури поверхні океану (ТПО) та кореляційні зв'язки між індексом Південного коливання (ПК) й аномаліями ТПО у Південній півкулі. На основі супутникових і контактних вимірів ТПО уточнено схему фронтів Південного океану, виявлено закономірності їхнього сезонного циклу й особливості міжрічної мінливості. Узагальнено результати попутних гідрометеорологічних вимірів, виконаних НЕС «Академик Фёдоров» за програмою Міжнародного Полярного Року 2007-2008. Досліджено сезонну й міжрічну мінливість морської криги різної згуртованості й кореляційні зв'язки між мінливістю згуртованості криги, температури повітря в регіоні Антарктичного півострова й індексами атмосферної циркуляції.

Oceanographic investigations within the framework of II stage of the State Program of Ukraine researches in Antarctica. Yu. V. Artamonov.

Abstract. In the work the main results of oceanographic researches, obtaining within the framework II-stage (2002-2008) of the State Program of Ukraine researches in Antarctica, are presented. It is noted that on this stage in default of marine expeditions main attention was focused the carrying out of researches on the basis of modern archives of hydrometeorological information. From these data the

seasonal variability of SST linear trends and cross-correlation between the Southern oscillation index (SOI) and SST anomalies in the South hemisphere are investigated. On the basis of the satellite and contact SST measurements the scheme of South ocean fronts is specified, the regularity of their seasonal cycle and feature of interannual variability are discovered. The results of the accompanying hydrometeorological measurements, carrying out CEV “Academic Fedorov” on the program of International Polar Year 2007-2008, are generalized. The seasonal and interannual variability of sea ices of different closeness and cross-correlation between variability of sea ices closeness, air temperature in the Antarctic peninsula region and atmospheric circulation indexes are investigated.

Key words: sea surface temperature, climatic seasonal cycle, linear trend, hydrological front, Antarctic sea ice closeness, large-scale current, South Oscillation Index, Antarctic Oscillation Index.

1. Введение

Современную историю океанографических исследований Украины в Антарктике можно разделить на два этапа. Первый этап, условно называемый экспедиционным, начался в 1997 г. после передачи Украине британской антарктической базы Фарадей, впоследствии станция Академик Вернадский. В первой половине 1997 г. в регионе Антарктического полуострова Украиной была проведена первая (после советского периода) комплексная океанографическая экспедиция на НИС «Эрнст Кренкель», крупнотоннажном судне водоизмещением около 4.5 тыс. тонн, способном выполнять научные работы в любом районе Мирового океана. На этом судне была выполнена крупномасштабная полигонная съёмка в районе Южных Оркнейских и Южных Шетландских островов, многочасовые станции на акватории архипелага Аргентинские острова. Исследования на НИС «Эрнст Кренкель» были продолжены в 1998 г. Последующие две экспедиции в Антарктику (март-апрель 2000 и 2002 гг.) проводились на НИС «Горизонт», судне меньшего тоннажа водоизмещением около 1.1 тыс. тонн. В эти годы были выполнены комплексные океанографические исследования в западной части пролива Брансфилда, в лагуне вулканического острова Дисепшен, в районе станции Академик Вернадский. В целом в результате проведения регулярных экспедиций в Антарктику в 1997–2002 гг. был накоплен обширный экспериментальный материал о термохалинной и кинематической структуре вод Атлантического сектора Антарктики. Описаны региональные особенности структуры и динамики вод, выявлены закономерности сезонного цикла гидрологических полей. Поскольку на первом этапе экспедиции проводились относительно регулярно (рис. 1), удалось сделать некоторые оценки влияния глобальных межгодовых вариаций в системе океан–атмосфера на гидрологию вод исследуемого региона. Впервые получены уникальные данные о мезомасштабной структуре вод на акватории архипелага Аргентинские острова. Полученные материалы позволили наметить стратегию дальнейших экспедиционных работ в рамках Программы исследований Украины в Антарктике на 2002–2010 гг. [1]. К сожалению, ввиду финансовых трудностей и отсутствия специализированного экспедиционного судна комплексные океанические исследования Украины в Антарктике с 2003 г. прекратились, и в последующие годы гидрологические работы ограничивались только прибрежными измерениями в районе станции Академик Вернадский (рис. 1). Некоторая активизация океанических работ наметилась в 2007-2008 гг., когда представитель Украины участвовал в совместных с Россией океанографических исследованиях, проведенных на НЭС «Академик Фёдоров» в рамках Международного Полярного Года. В целом второй этап исследований в Антарктике (после 2002 г.) характеризуется тем, что при отсутствии морских экспедиций основное внимание уделялось работе с современными базами архивных данных. В настоящей работе представлены наиболее важные результаты океанографических исследований, полученные в ходе выполнения Государственной программы исследований Украины в Антарктике за 2002–2008 гг.

2. Материалы

При проведении исследований использовались следующие массивы:

– массив среднемесячных значений ТПО и сплочённости морского льда в процентах (балльности) в одноградусной сетке, 1870–2002 гг. - BADC (*British Atmospheric Data Centre HadISSTICE*);

– массив среднемесячных значений спутниковых измерений ТПО в узлах сетки 54x54 км, 1986–2002 гг. (*архив AVHRR Ocean Pathfinder Data JPL NOAA/NASA*);

– массив среднемесячных значений ТПО и сплочённости морского льда в процентах (балльности) в одноградусной сетке, 1981–2008 гг. – NCEP (*National Center for Environmental Prediction*);

– массив среднемесячных значений ТПО в узлах одноградусной сетки Мировой базы гидрологических данных WOD (*World Ocean Database, 2005*).

Комплексное использование нескольких независимых массивов контактных и спутниковых измерений при исследовании закономерностей сезонной и межгодовой изменчивости океанографических полей позволяет получить наиболее достоверные физические результаты.

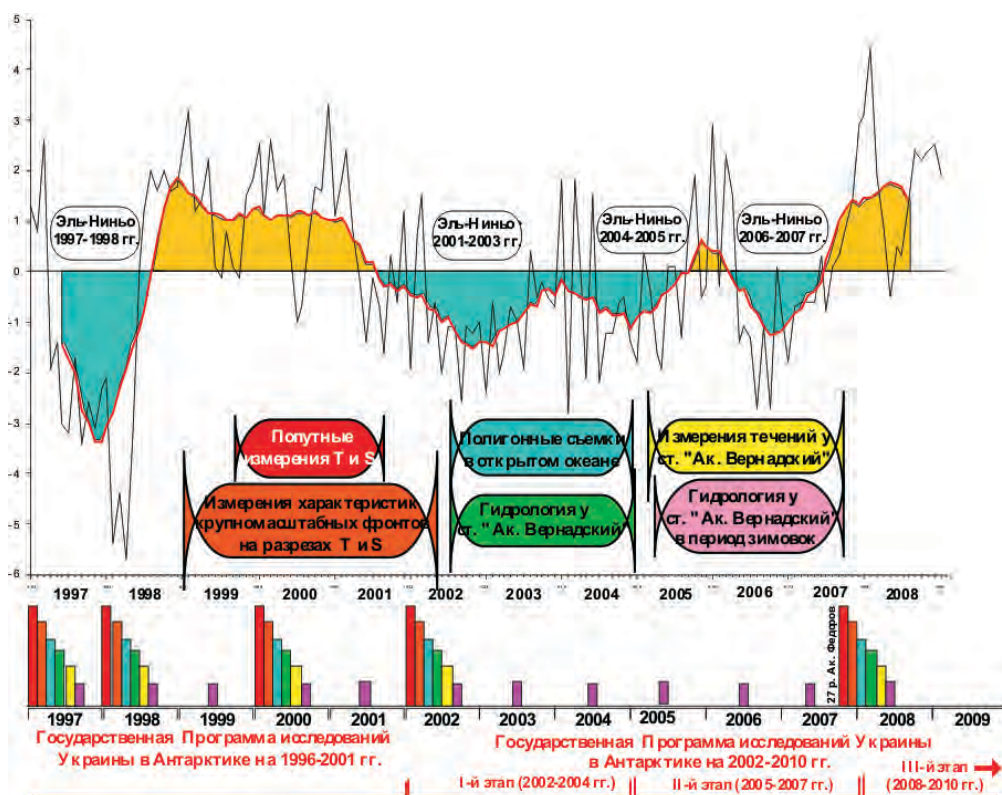


Рис. 1. Межгодовой ход индекса Южного Колебания (ЮК) и диаграмма видов океанографических работ, выполненных НАНЦ с 1997 по 2008 г.

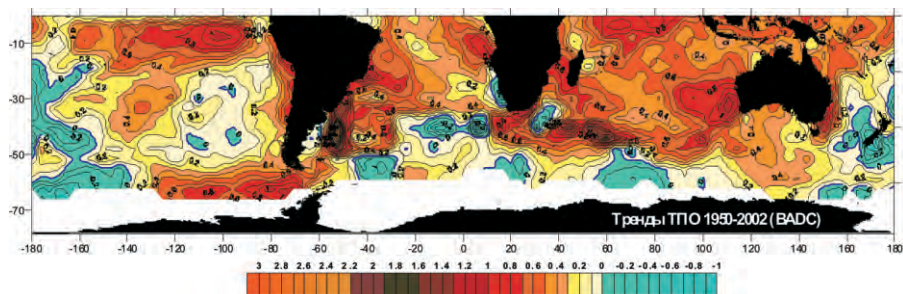


Рис. 2. Распределение линейных трендов ТПО, рассчитанных за период 1950–2002 гг. по данным массива BADC.

3. Основные результаты

Одним из наиболее важных результатов являются новые закономерности пространственно-временного распределения трендов ТПО в Южном океане, полученные на основе массива BADC. Показано, что за последние полвека в Южном океане в целом преобладают положительные тренды ТПО (рис. 2). Этот результат хорошо согласуется с современными представлениями о глобальном потеплении на Земном шаре [2]. Вместе с тем отмечается, что пространственное распределение положительных и отрицательных трендов носит достаточно сложный характер.

Экстремальные значения трендов ТПО обычно наблюдаются в зонах крупномасштабных течений. Наиболее высокие положительные тренды ТПО отмечены в пограничных течениях: Перуанском течении ($\sim 1.0^\circ\text{C}$), Зоне слияния Фолклендского и Бразильского течений ($> 2.0^\circ\text{C}$), Бенгальском и Мозамбикском течениях ($\sim 1.0^\circ\text{C}$), в Западно- ($\sim 1.0^\circ\text{C}$) и Восточно-Австралийском течениях ($> 1.5^\circ\text{C}$). Положительные тренды в зонах западных пограничных течений, следующих в южном направлении, свидетельствуют об увеличении в среднем за период 1950–2002 гг. выноса теплых тропических вод в умеренные широты, и, наоборот, в восточных пограничных течениях, следующих на север, уменьшается вынос холодных вод в тропические широты. Высокие значения положительных трендов ТПО отмечаются также в Антарктическом циркумполярном течении (АЦТ) между 40° и 25° в.д. ($> 1.5^\circ\text{C}$) и 60° и 120° з.д. ($\sim 1.0^\circ\text{C}$). В последнем случае высокие положительные тренды к западу от Антарктического полуострова и в проливе Дрейка хорошо согласуются с положительными трендами температуры воздуха, зафиксированными за последние полвека на станциях Академик Вернадский и Беллинсгаузен. Вероятным механизмом образования областей положительных трендов ТПО в зоне АЦТ является ослабление его скорости, что сопровождается уменьшением выноса холодных полярных вод на север.

Отрицательные тренды ТПО в Южном океане существенно ниже, чем положительные, и занимают ограниченные площади в районе Новой Зеландии, в море Скотия, в Атлантическом секторе АЦТ между 20° з.д. и 10° в.д., в море Содружества.

Анализ распределения трендов ТПО в разные месяцы года указывает на их существенную внутригодовую изменчивость (рис. 3, 4). В Тихом океане между 30° и 40° ю.ш. в зоне действия Южно-Тихоокеанского течения (ЮТТ) наблюдаются положительные тренды ТПО, которые достигают максимума ($\sim 0.8\text{--}0.9^\circ\text{C}$) в феврале-марте. На фоне общего ослабления трендов во вторую половину года, в июле, отмечается второй, более слабый максимум ($\sim 0.6\text{--}0.7^\circ\text{C}$). Полугодовой сигнал обнаруживается и в изменении скорости Южно-Тихоокеанского течения, которое контролирует вынос теплых тропических вод на юго-восток, и одной из вероятных причин появления положительных трендов ТПО является усиление ЮТТ.

В полярных широтах, между 55° и 65° ю.ш., наибольшие тренды ($\sim 1.9^{\circ}\text{C}$) наблюдаются в сентябре, в конце зимнего усиления АЦТ. Положительные тренды ТПО, вероятно, связаны с тенденцией к ослаблению скорости АЦТ в зимний период на межгодовом масштабе. Наиболее высокие тренды ТПО в течение всего года отмечаются в Зоне схождения Фолклендского и Бразильского течений (ЗСФБ). Как и в скоростях течений [3], в поведении трендов наблюдается полугодовой сигнал с максимумами $\sim 2.3^{\circ}\text{C}$ в мае и $\sim 2.1^{\circ}\text{C}$ в сентябре. Во внутригодовой изменчивости трендов ТПО в области к юго-востоку от Африки наблюдается один хорошо выраженный максимум ($\sim 2.3^{\circ}\text{C}$) в феврале. У западных и восточных берегов Австралии максимальные положительные тренды ($\sim 1-1.5^{\circ}\text{C}$) наблюдаются в июне-июле.

Есть основания считать, что изменчивость дрейфовых течений, косвенным показателем которых является поле ветра, вносит значительный вклад в формирование трендов ТПО. В сезонной изменчивости составляющих скорости ветра обнаруживаются закономерности, способствующие в определенные сезоны усилению дрейфового переноса теплых тропических вод на юг и ослаблению переноса холодных полярных вод на север. Тем самым на межгодовом масштабе создаются благоприятные условия для формирования положительных трендов ТПО [4]. Аналогичный механизм образования положительных трендов предложен в результате совместного анализа сезонной изменчивости трендов ТПО и течений, рассчитанных динамическим методом и по альтиметрическим данным [5].

Получены новые результаты при анализе высокоширотной реакции гидрометеорологических полей события Эль-Ниньо на основе массива BADC. Исследованы корреляционные связи между индексом Южного Колебания (ЮК) и ТПО в Южном

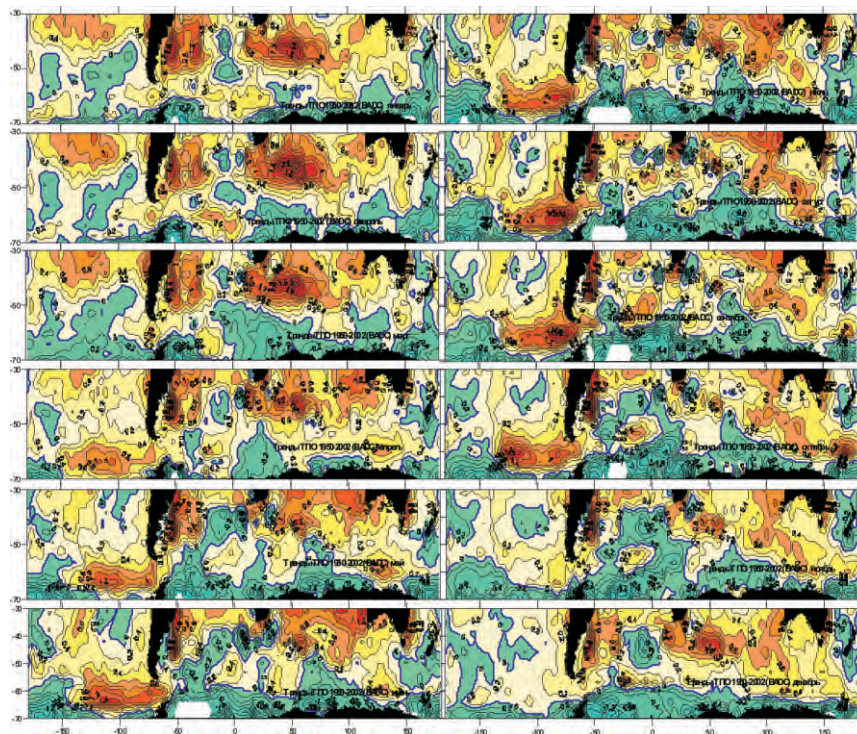


Рис. 3. Распределение линейных трендов ТПО в Южном океане по месяцам.

полушарии. Уточнено положение областей с прямой и обратной корреляционной зависимостью. Показано, что в экваториально-тропической зоне Южного полушария происходит смена знака экстремума кросскорреляционной функции $R(\tau)$ с отрицательного (-0.8) у экватора на положительный (0.65) у южной границы тропиков, ближе к центральной части Южного субтропического антициклонического круговорота (ЮСАК) (рис. 5, а) Временной сдвиг между реакцией ТПО и изменениями ЮК составляет 2–6 месяцев (рис. 5, б). К югу от ЮСАК значения $R(\tau)$ изменяются от 0.6 в зоне ЮТТ до -0.6 в зоне АЦТ.

В Антарктической зоне значения экстремумов $R(\tau)$ сохраняют отрицательный знак и монотонно уменьшаются по абсолютной величине до 0.25 на 64.5° ю.ш.

Анализ пространственных распределений экстремумов $R(\tau)$ и их сдвигов τ , между вариациями аномалий ТПО и индекса ЮК, распределений полей ТПО, её аномалий и составляющих скорости ветра для 1992 и 2000 гг., а также известных представлений о структуре и циркуляции вод позволил уточнить основные звенья в сложной цепи причинно-следственных связей между изменчивостью аномалий ТПО и ЮК [6, 7].

Положительную связь между аномалиями ТПО и ЮК к югу от экваториально-тропической зоны и в западном погранслое можно объяснить тем, что усиление (ослабление) пассатной циркуляции и, как следствие, западных периферий субтропических антициклонических круговоротов приводит к усилению (ослаблению) выноса тёплых

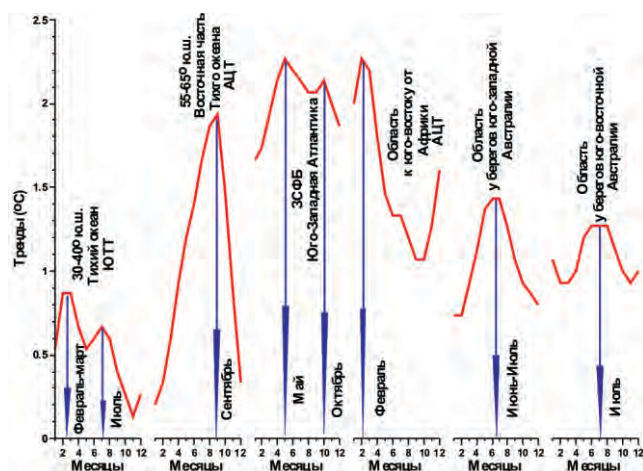


Рис. 4. Внутригодовой ход максимумов линейных трендов ТПО в Южном океане. Исходные кривые сглажены трёхточечным фильтром.

экваториальных вод в субтропические и умеренные широты и способствует формированию положительных (отрицательных) аномалий ТПО. В отличие от экваториально-тропической зоны, здесь реакция океана преимущественно запаздывает с запада на восток. К востоку от линии смены дат значения τ , изменяются от 1-2 месяцев на западе до 6-8 месяцев на востоке. Это соответствует скорости распространения реакции ТПО на изменения ЮК примерно 0.3 м/с. Отмечено, что на западе умеренных широт Южного полушария прослеживаются обширные области с отрицательными значениями τ , где вначале происходят изменения поля ТПО, а затем индекса ЮК. Отрицательные сдвиги наблюдаются также вдоль границ смены знака взаимно-корреляционных функций, где результаты статистически малодостоверны.

В полярных широтах Южного полушария в зоне АЦТ наблюдается чётко выраженная область с обратной корреляцией (до -0.6). Здесь, так же как в субтропических и умеренных широтах, сдвиги τ , возрастают с запада на восток. Вдоль 45° ю.ш. значения сдвигов изменяются от 1-2 месяцев на 150° з.д. до 4-5 месяцев на 100° з.д., что соответствует скорости

распространения реакции ТПО на изменение ЮК примерно 0.2 м/с. Обратную связь между аномалиями ТПО в зоне АЦТ и изменчивостью индекса ЮК можно объяснить тем, что в период усиления (ослабления) пассатной циркуляции в тропиках наблюдается усиление (ослабление) АЦТ в центральной и восточной части Тихоокеанского сектора и, как следствие, увеличение (ослабление) меридионального переноса холодных вод из антарктической области к северу и формирование отрицательных (положительных) аномалий ТПО.

Значительные успехи достигнуты в исследовании сезонной и межгодовой изменчивости структуры вод и фронтов в южной части Тихого океана по спутниковым данным из архива AVHRR Ocean Pathfinder Data JPL NOAA/NASA. Показано, что между аномалиями площадей холодных вод Перуанского апвеллинга и тёплых тропических вод и индексом атмосферной циркуляции ЮК выявлена значимая связь (рис. 6, а). Значение коэффициента корреляции между индексом ЮК и аномалиями площадей тёплых тропических вод составляет -0.80, между индексом ЮК и аномалиями площадей холодных вод в области апвеллинга 0.65, между аномалиями площадей холодных и тёплых вод -0.75 [8].

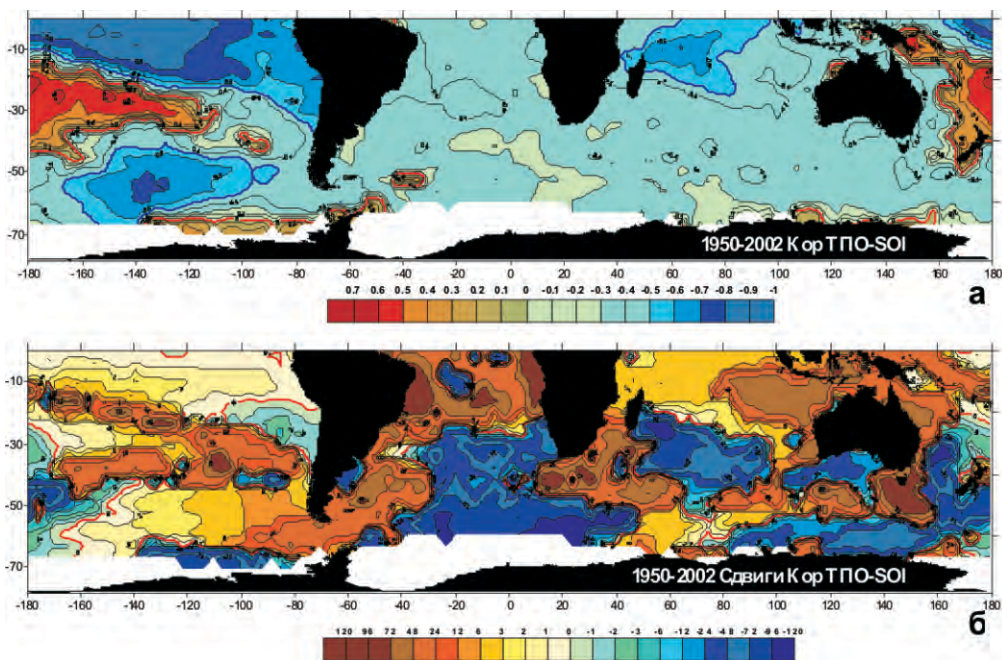


Рис. 5. Пространственное распределение величин экстремумов $R(\tau)$ (а) и разности фаз τ , (б) между вариациями аномалий ТПО и индекса ЮК.

Установлено, что события Эль-Ниньо оказывают заметное влияние на межгодовые вариации характеристик фронтов. Наиболее тесные связи с индексом ЮК и аномалиями площадей тёплых тропических вод обнаружены для характеристик Южного тропического фронта (ЮТФ). Положительные аномалии площадей тёплых тропических вод, обусловленные событиями Эль-Ниньо, сопровождаются положительными аномалиями температуры (до 5°C) в ЮТФ, смещением фронта к северу на 300–400 км относительно среднего положения и отрицательными аномалиями величин МГТ (до -0.4°C/54 км), которые свидетельствуют об ослаблении фронта. Коэффициенты корреляции R между аномалиями тёплых вод в экваториальной зоне Тихого океана, индексом ЮК и среднегодовыми характеристиками фронта достигают 0.6–0.7 (рис. 6, б, в).

Наиболее тесная значимая связь ($R \sim 0.6-0.8$) обнаружена между изменчивостью ЮК, аномалиями площадей тёплых тропических вод и величиной градиента и температурой на оси Перуанского участка ЮТФ. Установлено, что в периоды Эль-Ниньо наблюдается ослабление интенсивности фронта, смещение его долготного положения (~ 100 км) к западу и существенное повышение температуры на оси фронта ($\sim 6^\circ\text{C}$). Вариации интенсивности фронта в периоды активной фазы Эль-Ниньо достигают $1.0^\circ\text{C}/54$ км. Выявлено, что по мере удаления фронтов от основного очага формирования межгодовых аномалий теплых вод, вызванных событиями Эль-Ниньо, реакция характеристик фронтов на эти события ослабевает.

Выполнены исследования сезонной и межгодовой изменчивости Фронта моря Скотия (ФМС), который имеет важное промысловое значение [9]. Установлено, что в климатическом сезонном цикле ФМС чётко прослеживается от месяца к месяцу, а его интенсивность изменяется с преобладающим годовым периодом. Показано, что Фронт моря Скотия усиливается в 3-4 раза в тёплое время года, когда обостряются контрасты температуры между

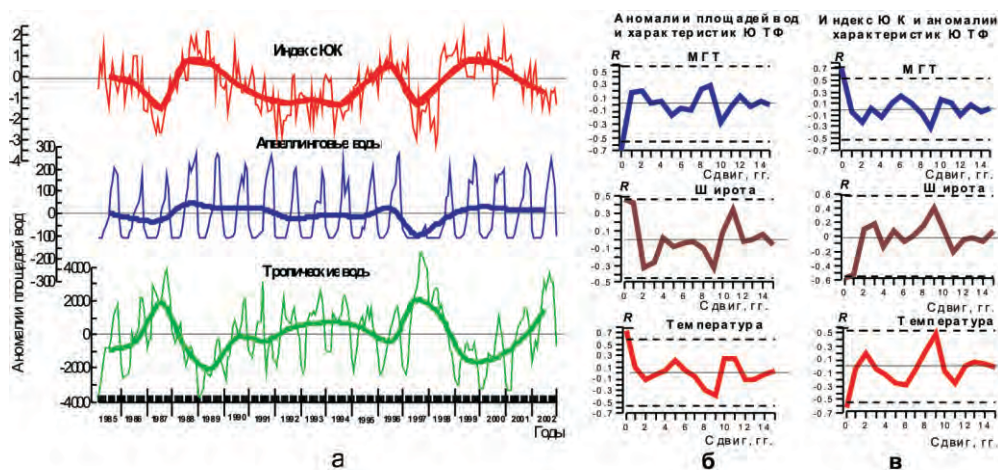


Рис. 6. Межгодовой ход индекса ЮК (красные линии), аномалий площадей холодных вод с температурой $18-19^\circ\text{C}$ в зоне Перуанского апвеллинга (синие линии) и тёплых тропических вод с температурой $28-33^\circ\text{C}$ (зелёные линии) (единица по вертикальной оси составляет $54 \times 54 \text{ км}^2$).

Жирные линии – среднегодовые значения (а). Кросскорреляционные функции между среднегодовыми аномалиями характеристик Южного тропического фронта и площадей тёплых тропических вод в Тихом океане (б) и индексом ЮК (в).

Штриховые линии – границы 95%-ного доверительного интервала.

холодными водами, образующимися в результате таяния льдов, и более тёплыми поверхностными водами, переносимыми Южной ветвью АЦТ. Максимальные сезонные колебания интенсивности фронта ($0.5^\circ\text{C}/54$ км) обнаружены в районе минимума внутригодовых колебаний границы дрейфующих льдов. Внутригодовые изменения широтного положения фронта в среднем не превышают 100 км. Температура на оси Фронта моря Скотия изменяется с годовым периодом с амплитудой до 2°C [10].

Показано, что события Эль-Ниньо оказывают существенное влияние на изменчивость характеристик Фронта моря Скотия. Появление положительных аномалий площадей тёплых вод в тропиках, характеризовавших Эль-Ниньо 1986–1988 гг., сопровождалось заметным смещением фронта на юг, уменьшением его температуры и ослаблением интенсивности. Менее чётко эти закономерности прослежены для Эль-Ниньо 1994-1995 и 1997-1998 гг. (рис. 7, слева). Максимальные значимые коэффициенты корреляции между среднегодовыми аномалиями площадей тёплых тропических вод и характеристик ФМС составили: для МГТ 0.6

при фазовом сдвиге в 1 год, для широтного положения фронта -0.55 при сдвиге в 1 год, для температуры во фронте -0.60 при отсутствии фазового сдвига (рис. 7, справа). Межгодовые вариации величины МГТ достигают $0.7^{\circ}\text{C}/54\text{ км}$, широтное положение фронта изменяется от года к году на $200\text{--}300\text{ км}$, а температурный диапазон – на $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$.

Значимые связи между характеристиками ФМС и процессами в тропической зоне Тихого океана обусловлены общими закономерностями распространения температурных аномалий. Распространение сигнала Эль-Ниньо из тропической зоны Тихого океана в умеренные и полярные широты проявляется в виде волн Россби, которые сопровождаются смещением аномалий тёплых вод на юг. Попадая в Антарктическое Циркумполярное течение, эти аномалии следуют в восточном направлении и влияют на гидрологический режим в умеренных и полярных широтах Атлантики [2]. Связи между характеристиками ФМС и событиями Эль-Ниньо по мере продвижения на восток ослабевают.

Получены новые результаты в ходе обработки попутных измерений ТПО, выполненных на НЭС «Академик Фёдоров» в период Международного Полярного Года (2007-2008). Выполнен анализ пространственного распределения аномалий ТПО, рассчитанных относительно разных климатических массивов (BADC, WOD-2005, AVHRR OPD JPL NOAA/NASA) [11].

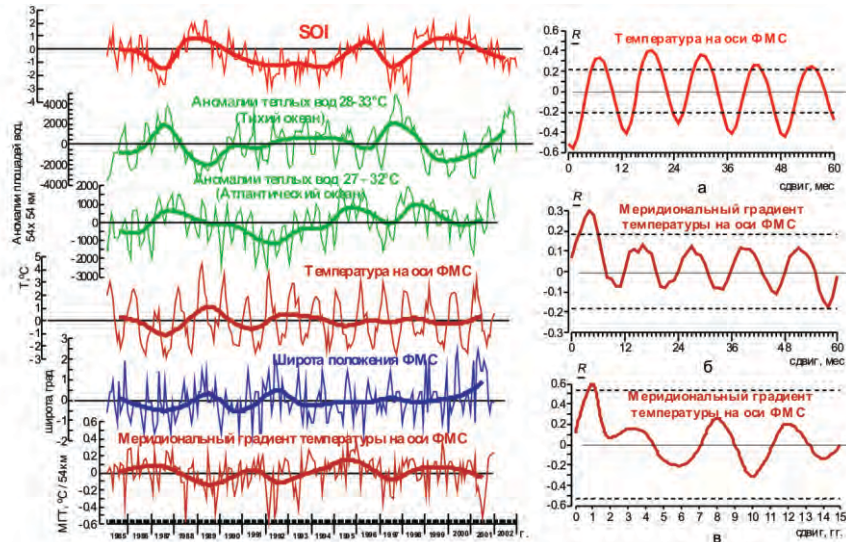


Рис. 7. Межгодовой ход индекса ЮК, аномалий площадей тёплых тропических вод Тихого и Атлантического океанов и характеристик ФМС на 65° з.д. Жирные линии – среднегодовые аномалии вышеуказанных характеристик (слева). Кросскорреляционные функции среднемесячных (а, б) и среднегодовых (в) аномалий площадей тёплых тропических вод Тихого океана и характеристик ФМС на 65° з.д. (справа). Штриховые линии – границы 95%-ного доверительного интервала.

Сравнение фактических значений ТПО с её климатическими значениями по гидрологическим и спутниковым данным показало, что максимальные положительные аномалии ТПО ($2.5\text{--}3.0^{\circ}\text{C}$) были получены относительно гидрологического климата (WOD-2005), где судно пересекало две зоны Западно-Африканского апвеллинга (рис. 8). В целом широтной ход и знак аномалий ТПО по независимым оценкам был идентичен, и в Атлантике преобладали положительные аномалии ТПО. Отрицательные аномалии наблюдались у берегов Африки при подходе к п. Кейптаун. Наибольшее отличие в величинах аномалий получено в зоне апвеллинга, при расчете аномалий относительно массива BADC. Вероятно, это связано с существенной пространственной изменчивостью ТПО на относительно

небольшой площади зоны апвеллинга, и особенности процедуры интерполяции первичных данных в узлы сетки в разных независимых массивах могут сказываться на величине климатической нормы и расчётной аномалии.

В Субантарктической и Полярной зонах Южного океана температура на поверхности тоже была преимущественно выше нормы. Отрицательные аномалии температуры воды на поверхности океана наблюдались южнее Антарктического полярного фронта и на акваториях, прилегающих к антарктическим станциям.

По результатам попутных измерений установлено, что крупномасштабные фронты прослеживаются не только в поле градиентов ТПО и в распределении величин внутригодового (СКОсез) и межгодового (СКОмеж) среднеквадратического отклонения ТПО [12], но также в поле аномалий температуры. В пределах фронтальных зон наблюдался резкий перепад величин аномалий ТПО, вплоть до изменения их знака.

Важные результаты получены при исследовании сезонных и межгодовых вариаций морских льдов в Антарктике и корреляционных связей между изменчивостью сплочённости льдов, температуры воздуха и индексов атмосферной циркуляции ЮК и Антарктического колебания (ААК) [13–16]. На основе массива NCEP показано, что сезонная изменчивость

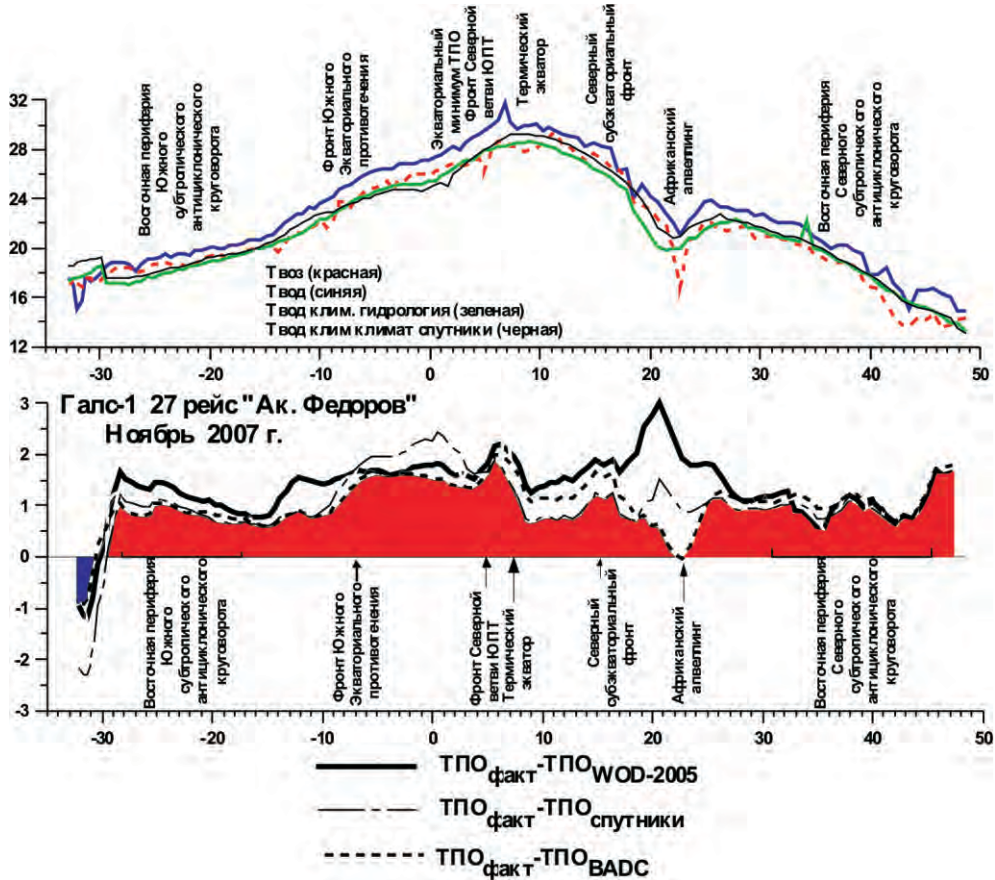


Рис. 8. Распределение температуры воздуха и ТПО по разным типам данных (вверху) и аномалий ТПО (внизу) на трансатлантическом галсе в ноябре 2007 г.

сплоченности льдов наиболее ярко выражена в морях Уэдделла, Лазарева, Содружества, на северных границах морей Росса, Амундсена и Беллинсгаузена. Максимальные значения СКО без отмечаются в морях Уэдделла и Лазарева, где наблюдается интенсивная сезонная динамика вод и происходят наибольшие сезонные смещения границы морских льдов. Области наибольшей сезонной изменчивости сплоченности льдов вытянуты в восточном направлении вдоль движения вод АЦТ. Области минимальной сезонной изменчивости сплоченности льдов наблюдаются в прибрежных районах Антарктики, где расположены обширные шельфовые ледники: у восточного берега Антарктического полуострова (ледник Ларсена), в южных частях морей Уэдделла (ледники Ронне и Фильхнера), Росса (ледник Росса), Амундсена (ледник Аббот).

При исследовании межгодовой изменчивости сплоченности льдов показано, что все известные интенсивные Эль-Ниньо находят свое отражение в поведении среднемесячных аномалий суммарных площадей морского льда 90–100%-ной балльности. Это проявляется в изменении амплитуды сезонных колебаний, продолжительности сезонов льдообразования и льдотаяния, форме сезонного сигнала, соотношения положительных и отрицательных аномалий в сезонном цикле.

Установлено, что наибольшей межгодовой изменчивости подвержены льды в морях Уэдделла, Амундсена, Беллинсгаузена и в районе между 130° з.д. и 150° з.д. Величины СКО меж здесь почти на порядок выше, чем в других регионах. Зона интенсивных межгодовых

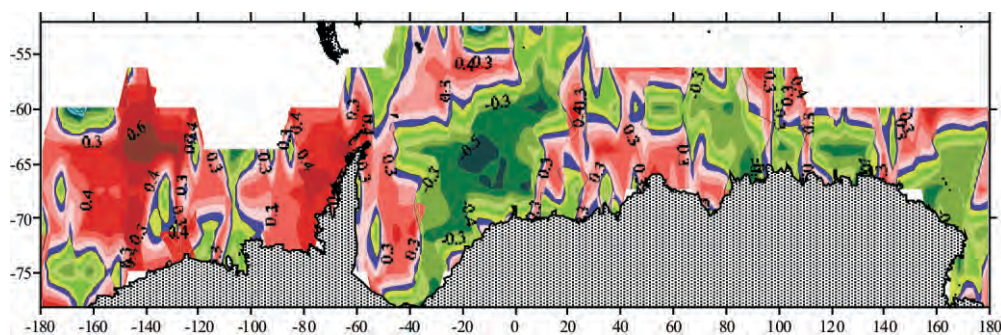


Рис. 9. Распределение коэффициентов корреляции между среднегодовыми значениями балльности морских льдов и индексом ЮК.

вариаций сплоченности льдов располагается к югу от основной струи АЦТ, которая является естественной границей распространения морских льдов.

Пространственная структура корреляционных связей между сплоченностью морских льдов и индексами ЮК и ААК характеризуется вытянутостью областей экстремальных значений коэффициентов корреляции ($R_{ЮК}$, $R_{ААК}$) в меридиональном направлении, что может быть обусловлено господствующим направлением дрейфа льда на меридиональных перифериях крупномасштабных циклонических круговоротов, формирующихся у берегов Антарктиды.

Максимальная прямая корреляционная связь между сплоченностью льда и индексом ЮК ($R_{ЮК} \sim 0.6$) отмечается в области, где наблюдается наибольшая межгодовая изменчивость распределения льдов (130–150° з.д., 60–65° ю.ш.) (рис. 9). Здесь изменчивость индекса ЮК и сплоченности льда проявляется практически квазисинхронно. Область значимой положительной корреляции ($R_{ЮК} \sim 0.5$) наблюдается к западу от Антарктического полуострова. Реакция льда на ЮК запаздывает примерно на 4 года. Значимые положительные связи отмечаются также в море Содружества ($R_{ЮК} \sim 0.3$). Временной отклик морского льда здесь преимущественно запаздывает от ЮК на 2–4 года.

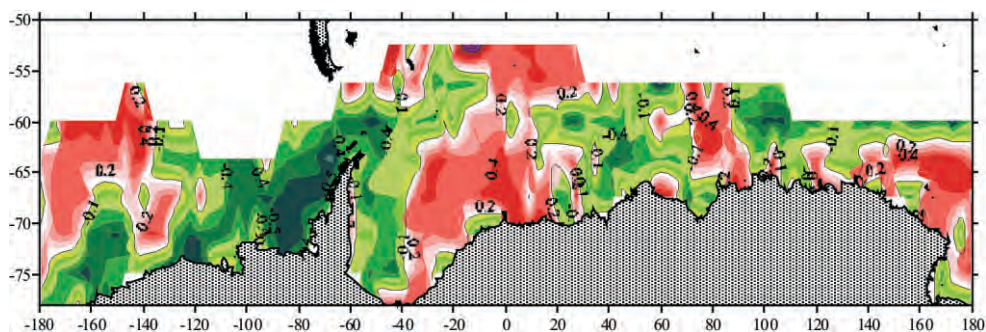


Рис. 10. Распределение коэффициентов корреляции между среднегодовыми значениями балльности морских льдов и индексом ААК.

Обратная корреляционная связь ($R_{ЮК} \sim -0.6$) отмечается в море Уэдделла. Влияние ЮК на ледяной покров отмечается с задержкой около 2 лет. Отрицательная корреляционная связь ($R_{ЮК} \sim -0.5$) наблюдается и в море Дейвиса. Здесь реакция морского льда преимущественно запаздывает от ЮК на 2–4 года.

Значимые корреляционные связи получены между сплочённостью льдов и индексом ААК (рис. 10). В море Уэдделла наблюдаются положительные значения $R_{ААК}$ от 0.2 до 0.4 на сдвиге около 2 лет. В районе между 130–150° з.д. и 60–65° ю.ш. отмечены такие же значения $R_{ААК}$ с временным откликом сплочённости льда 1 год. Обратная связь между льдом и ААК выявлена вокруг Антарктического полуострова. К западу от полуострова значения $R_{ААК} \sim -0.6$, при отсутствии временного сдвига, к востоку $-R_{ААК} \sim -0.4$, а временной сдвиг составляет 2 года.

Высокие значения R получены между температурой воздуха на станциях Беллинсгаузен и Rothera ($R \sim -0.76$), станциях Orcadas и Marambio ($R \sim -0.65$) и сплочённостью льда в районе станции Академик Вернадский. Наиболее тесная связь ($R = -0.81$) отмечается между среднегодовыми рядами температуры воздуха на станции Академик Вернадский и балльностью льда.

Проведено сравнение особенностей межгодовой изменчивости сплочённости льдов для Арктического и Антарктического бассейнов. Установлено, что наибольшие внутригодовые изменения СКОмеж (межгодового среднеквадратического отклонения) наблюдаются для балльности льдов 90–100%. В Арктике минимальные значения СКОмеж отмечаются с февраля по июнь, в период максимального количества 100%-го льда (рис. 11, а, б). Максимальные значения СКОмеж для балльности льдов 90–100% наблюдается в июле–сентябре, когда прослеживается минимальное количество льда 100%-ной балльности и максимальное количество льда меньших балльностей. Второй минимум СКОмеж льдов 90–100%-ной балльности отмечается в ноябре, когда происходит интенсивное нарастание льдов 100%-ной балльности. В январе, когда формирование льдов 100%-ной балльности практически заканчивается, отмечается второй максимум СКОмеж.

В Антарктике минимальные значения СКОмеж отмечаются в конце лета, в период минимального количества льда вокруг материка. С марта-апреля начинается резкий рост значений СКОмеж, которые достигают максимума в июне для балльности льда 100%, для льдов балльностью 80–90% рост значений СКОмеж продолжается до сентября. (рис. 11, в). Климатический сезонный цикл аномалий площадей льдов различной сплочённости показывает, что наиболее интенсивное формирование льдов 100%-ной сплочённости наблюдается с мая по июль (рис. 11, г).

Таким образом, их максимальная межгодовая изменчивость приходится примерно на середину этого периода и обуславливается межгодовой изменчивостью условий выхолаживания в период интенсивного льдообразования. Позднее, в августе-сентябре,

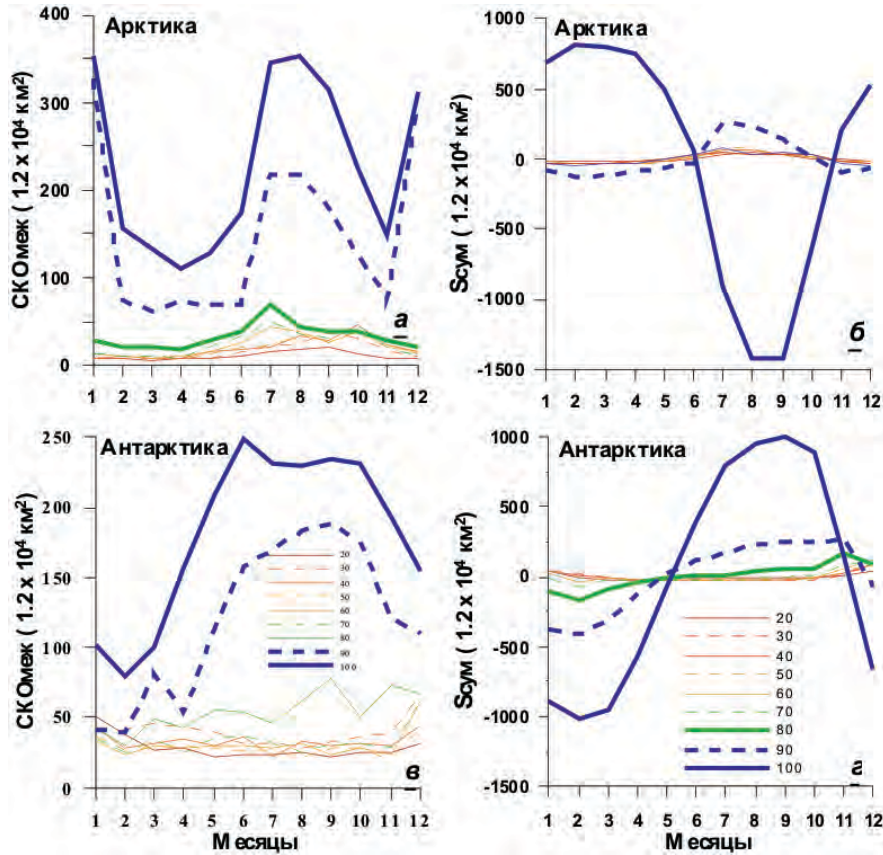


Рис. 11. Изменение по месяцам межгодовых среднеквадратических отклонений (а, в) и климатический сезонный цикл (б, г) аномалий площадей морских льдов разной балльности (ед. $1.2 \times 10^4 \text{ km}^2$) в Арктике (а, б) и в Антарктике (в, г).

формирование сплошного льда замедляется, и уровень его межгодовой изменчивости в этот период также изменяется незначительно. В отличие от сплошных льдов, площадь льдов 80–90%-ной балльности продолжает медленно увеличиваться почти до ноября, их максимальная межгодовая изменчивость отмечается в сентябре. В октябре-ноябре, с началом интенсивного таяния льдов, межгодовая изменчивость аномалий площадей льдов 90–100%-ной балльности уменьшается. Для льдов меньшей балльности (ниже 80%) максимальная межгодовая изменчивость наблюдается в декабре, когда в период максимального льдотаяния увеличиваются площади, занятые плавающими льдинами и айсбергами.

Одной из причин различий в межгодовой изменчивости сплочённости льдов по месяцам в Арктике и Антарктике являются особенности орографии бассейнов. Северный Ледовитый океан является почти замкнутым бассейном, поэтому межгодовые вариации в системе океан–атмосфера в большей степени отражаются на общем количестве льда, находящегося внутри бассейна в периоды его максимально нарастания и таяния. В Антарктике существует постоянный вынос льда крупномасштабными течениями из прибрежных районов в открытый океан. Этот процесс нивелирует общий уровень межгодовых вариаций льдов Антарктики, особенно в летний период Южного полушария, когда количество льда минимально.

4. Заключение

В период выполнения второго этапа (2002–2008 гг.) Программы исследований Украины в Антарктике океанографические исследования проводились, главным образом, на основе отечественных и зарубежных баз архивных данных. По этим данным исследованы внутригодовая изменчивость линейных трендов ТПО и корреляционные связи между индексом Южного колебания и аномалиями температуры поверхности океана в Южном полушарии. На основе спутниковых и контактных измерений ТПО уточнена схема фронтов Южного океана, выявлены закономерности их сезонного цикла и особенности межгодовой изменчивости. Обобщены результаты попутных гидрометеорологических измерений, выполненных НЭС «Академик Фёдоров» по программе Международного Полярного Года 2007-2008. Исследованы сезонная и межгодовая изменчивость морских льдов различной сплочённости и корреляционные связи между изменчивостью сплочённости льдов, температуры воздуха в регионе Антарктического полуострова и индексами атмосферной циркуляции. Проведено сравнение особенностей межгодовой изменчивости сплочённости льдов для Арктического и Антарктического бассейнов.

Выполненные исследования существенно расширяют представления об изменчивости структуры вод в Южном океане. В целом создана большая научно-информационная база, расширяющая физические основы для проведения Украиной дальнейших океанографических, биоресурсных и климатических исследований в Антарктике. Получены новые результаты, которые позволяют верифицировать океанические и атмосферные модели и уточняют граничные условия для их совершенствования.

Несмотря на успехи, достигнутые Украиной в океанографических исследованиях Южного океана, не реализован ряд возможностей, которые необходимо осуществить в будущем. Во-первых, необходимо расширить исследования в районе станции Академик Вернадский и проводить регулярные океанографические съёмки на акватории архипелага Аргентинские острова. Это позволит уточнить наши представления о влиянии глобальных климатических процессов в системе океан–атмосфера на локальный климат. Во-вторых, понимание регионального климата невозможно без изучения фоновых океанографических условий. Выполнение этой задачи требует, наряду с исследованиями на основе массивов архивных данных контактных и спутниковых измерений, возобновления Украиной комплексных морских экспедиций в Антарктику на хорошо оснащённом судне, способном выполнять как логистические операции в районе станции Академик Вернадский, так и научные исследования в открытых районах океана.

Одним из путей расширения океанографических исследований Украины в Антарктике является использование преимуществ международного сотрудничества. Примером такого плодотворного сотрудничества являются совместные Украинско-Российские океанографические исследования с борта НЭС «Академик Фёдоров» в рамках Международного Полярного Года.

Литература

1. **Артамонов Ю.В., Булгаков М.П., Вашенко В.М., Ломакин П.Д.** Океанографічні дослідження України в Атлантичному секторі Антарктики (1997-2004). Київ.: Наукова думка, 2006. 164 с.
2. **Turner J.** Review the El NICO-Southern Oscillation and Antarctica // *Int. J. Climatology*. 2004. – № 24. – Р. 1–31.
3. **Артамонов Ю.В., Булгаков Н.В., Ломакин П.Д.** Циркуляция вод деятельного слоя Южной Атлантики // Препринт. МГИ НАНУ, Севастополь. 2001. 86 с.
4. **Артамонов Ю.В., Бабий М.В., Скрипалева Е.А.** Исследование особенностей сезонной изменчивости трендов составляющих скорости ветра и температуры поверхности океана в зонах интенсивных океанических течений // Доклад на международном научно-техническом семинаре «Системы контроля окружающей среды». Севастополь, МГИ НАНУ. 2010 г.
5. **Артамонов Ю.В., Бабий М.В., Букатов А.Е., Скрипалева Е.А.** Региональные особенности сезонной изменчивости линейных трендов поля температуры в Атлантическом океане и их связь с крупномасштабной циркуляцией вод // МГЖ. 2008. № 4. – С. 17-27.
6. **Артамонов Ю.В., Бабий М.В., Букатов А.Е.** Корреляционные связи между индексами атмосферной циркуляции и аномалиями температуры на поверхности Мирового океана // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. 2007. С. 166-169.
7. **Артамонов Ю.В., Бабий М.В., Букатов А.Е., Скрипалева Е.А.** Корреляционные связи аномалий температуры поверхности Тихого океана и индекса Южного Колебания // УАЖ. 2009. № 12. С. 137-146.
8. **Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А.** Изменчивость гидрологических фронтов Перуанско-Чилийского сектора по спутниковым данным // Украинский Антарктический журнал. 2006. № 45. С. 109-116.
9. **Богданов М.А., Орадовский С.Г., Солянкин Е.В., Хвацкий Н.В.** О фронтальной зоне моря Скотия // Океанология. – 1969. – 9. Вып. 6. – С. 966–974.
10. **Артамонов Ю.В., Ломакин П.Д., Скрипалева Е.А.** Сезонная и межгодовая изменчивость характеристик Фронта моря Скотия по спутниковым измерениям температуры поверхности океана // МГЖ. 2008. № 1. – С. 57-67.
11. **Артамонов Ю.В., Бунякин В.П., Кислицин С.П., Скрипалева Е.А.** Пространственная структура аномалий температуры поверхности океана по данным попутных измерений на НЭС «Академик Федоров» в летний период 2007-2008 гг. // Украинский Антарктический журнал. – 2007/2008. № 6-7. С. 90-96.
12. **Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А.** Структура и сезонная изменчивость крупномасштабных фронтов Атлантического океана по спутниковым данным // Исследования Земли из космоса. – 2005. – № 4. – С. 62–75.
13. **Артамонов Ю.В., Букатов Ант.А.** Межгодовая изменчивость ледовых условий Антарктики по данным массива ВADC // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. 2006. С. 251-254.
14. **Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Букатов Ант.А.** Межгодовая изменчивость ледовых условий в регионе Антарктического полуострова и ее связь с индексами атмосферной циркуляции // УАЖ. – 2007/2008. № 6-7. С. 167-174.
15. **Artamonov Yu.V., Bukatov A.A., Skripaleva E.A.** Interannual variability of sea ice closeness of the Arctic and Antarctic // *Geophysical Researches Abstracts. Manifestations of global climate change in the Arctic Ocean.* European Geosciences Union General Assembly (<http://meetings.copernicus.org/egu2009>). EGU General Assembly. Vienna, Austria. April 19–24 2009. V. 11.
16. **Еремеев В.Н., Артамонов Ю.В., Букатов А.А., Скрипалева Е.А.** Пространственно-временная изменчивость сплоченности морского льда Антарктики // Геоинформатика. 2009. № 2. С. 48-55.