

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].

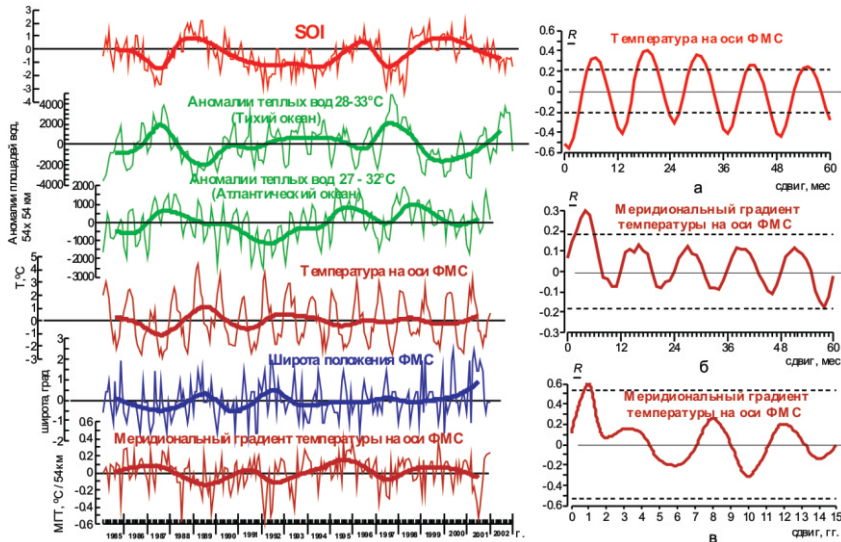


Рис. 7. Межгодовой ход индекса ЮК, аномалий площадей тёплых тропических вод Тихого и Атлантического океанов и характеристик ФМС на 65° з.д. Жирные линии – среднегодовые аномалии вышеуказанных характеристик (слева). Кросскорреляционные функции среднемесячных (а, б) и среднегодовых (в) аномалий площадей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

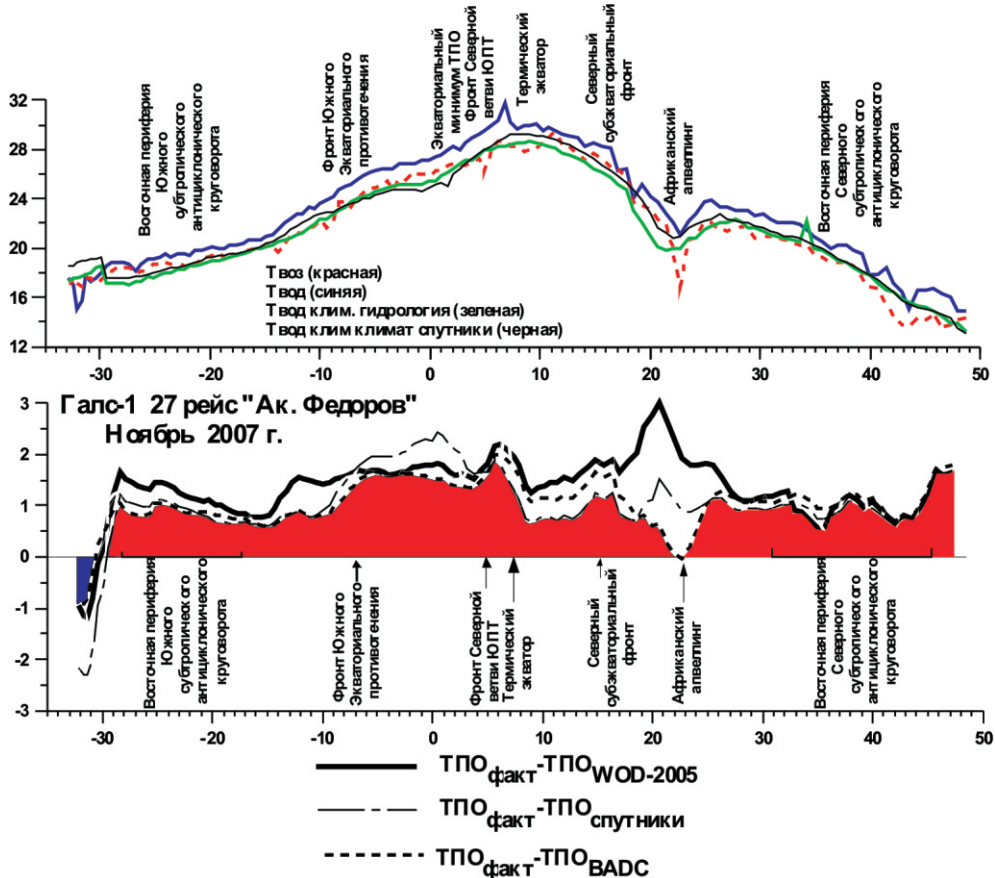


Рис. 8. Распределение температуры воздуха и ТПО по разным типам данных (вверху) и аномалий ТПО (внизу) на трансатлантическом галсе в ноябре 2007 г.

сплоченности льдов наиболее ярко выражена в морях Уэдделла, Лазарева, Содружества, на северных границах морей Росса, Амундсена и Беллинсгаузена. Максимальные значения СКОсез отмечаются в морях Уэдделла и Лазарева, где наблюдается интенсивная сезонная динамика вод и происходят наибольшие сезонные смещения границы морских льдов. Области наибольшей сезонной изменчивости сплочённости льдов вытянуты в восточном направлении вдоль движения вод АЦТ. Области минимальной сезонной изменчивости сплочённости 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 сплочённости 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 СКОмеж здесь почти на порядок выше, чем в других регионах. Зона интенсивных межгодовых

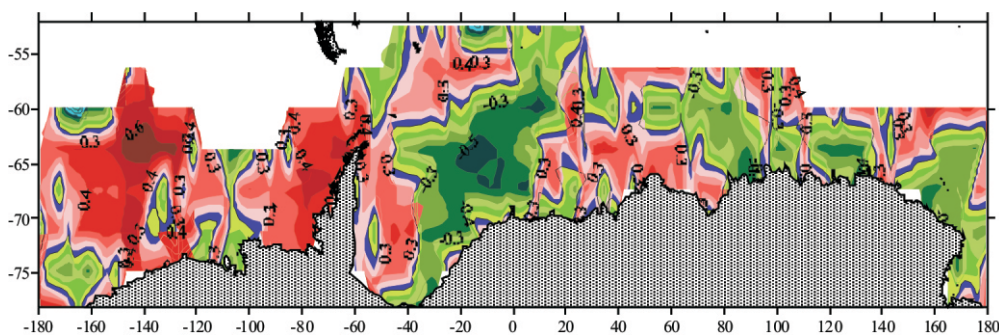


Рис. 9. Распределение коэффициентов корреляции между среднегодовыми значениями балльности морских льдов и индексом ЮК.

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

Пространственная структура корреляционных связей между сплочённостью 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 сплочённостью 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 сплочённости 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.

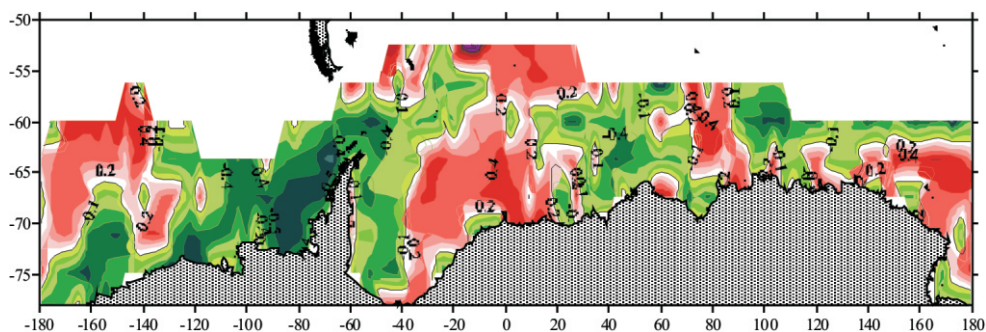


Рис. 10. Распределение коэффициентов корреляции между среднегодовыми значениями балльности морских льдов и индексом ААК.

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,

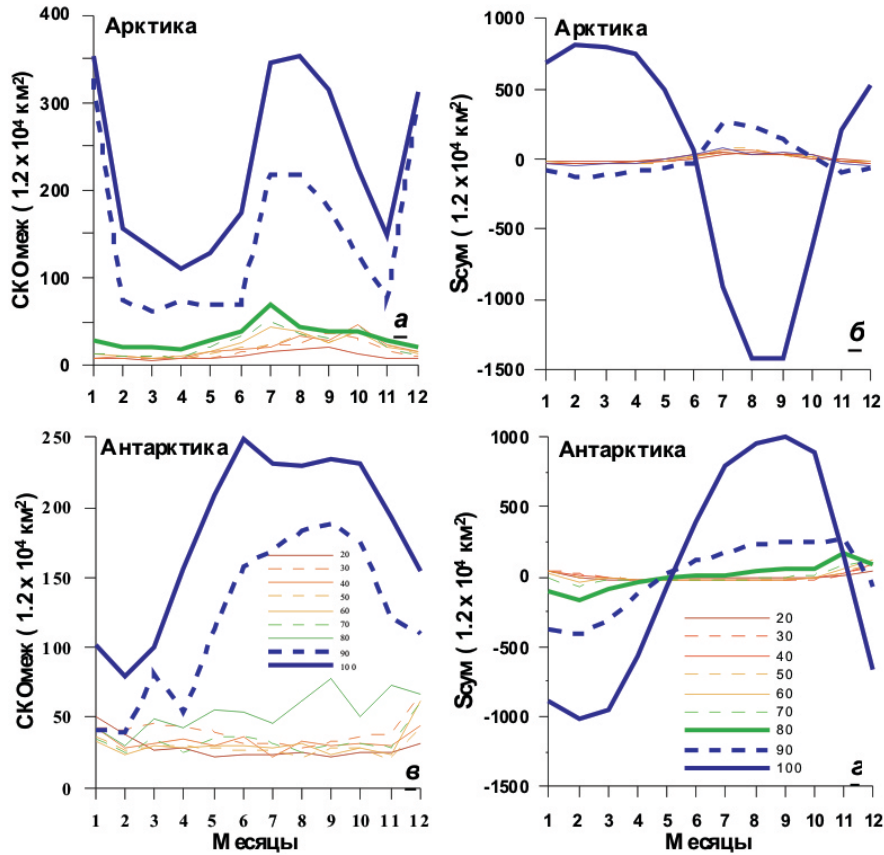


Рис. 11. Изменение по месяцам межгодовых среднеквадратических отклонений (а, в) и климатический сезонный цикл (б, г) аномалий площадей морских льдов разной балльности (ед. $1.2 \times 10^4 \text{ km}^2$) в Арктике (а, б) и в Антарктике (в, г).

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.