

УДК 551.46 (269.4)

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В РЕГИОНЕ АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОЛУОСТРОВА И ЕЁ СВЯЗЬ С ИНДЕКСАМИ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Ю.В. Артамонов, Е.А. Скрипалёва, Ант.А. Букатов

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь,
e-mail: zagorod@ibss.iuf.net*

Реферат. По данным массива BADC HadISST ICE, за период 1969–2002 гг. исследованы особенности проявления межгодовых вариаций морских льдов разных сплочённостей на масштабах нескольких десятилетий, оценены корреляционные связи между изменчивостью сплочённости льдов, температуры воздуха на полярных станциях и индексов атмосферной циркуляции ЮК (Южного колебания) и ААК (Антарктического колебания). Показано, что максимальные межгодовые вариации характерны для льдов 90–100%-ной сплочённости. Отмечено, что наибольшие аномалии сплочённости льда в периоды Эль-Ниньо наблюдаются в регионе Антарктического полуострова, в морях Содружества, Росса. Реакция на события Эль-Ниньо наиболее выражена в поведении положительных аномалий сплочённости льда. Выявлены высокие, значимые на 95%-ном уровне корреляционные связи между ЮК, ААК и сплочённостью льдов к западу от Антарктического полуострова. Между ААК и льдом отмечается обратная корреляция на сдвиге до одного года, а между ЮК и льдом – прямая на сдвиге около 6 лет. Высокая обратная корреляция с нулевым сдвигом выявлена для температуры воздуха и бальности льда в точках, расположенных вблизи полярных станций.

Міжрічна мінливість льдових умов у регіоні Антарктичного півострова та її зв'язок із індексами атмосферної циркуляції. Ю.В. Артамонов, О.О. Скрипальова, Ант.О. Букатов.

Реферат. За даними масиву BADC HadISST ICE, за період 1969–2002 рр. досліджено особливості прояву міжрічних варіацій морської криги різної бальності на масштабах кількох десятиліть, оцінено кореляційні зв'язки між мінливістю бальності криги, температури повітря на полярних станціях та індексів атмосферної циркуляції ПК (Південного коливання) та ААК (Антарктичного коливання). Показано, що максимальні міжрічні варіації характерні для криги 90–100%-вої бальності. Найбільші аномалії бальності льоду в періоди Ель-Нін'єо спостерігаються в регіоні Антарктичного півострова, в морях Співдружності та Росса. Реакція на події Ель-Нін'єо найбільш виражена в поведінці позитивних аномалій бальності криги. Виявлено високі, значимі на 95%-вому рівні кореляційні зв'язки між ПК, ААК та бальністю криги на захід від Антарктичного півострова. Між ААК та кригою відзначено зворотну кореляцію зі зсувом до одного року, між ПК та кригою – пряму кореляцію зі зсувом близько 6 років. Високу зворотну кореляцію з нульовим зсувом виявлено для температури повітря та бальності криги в точках, розташованих поблизу полярних станцій.

Ice conditions interannual variability in the Antarctic Peninsula region and its connection with the atmospheric circulation indexes. Ju.V. Artamonov, E.A. Skripaleva, Ant.A. Bukatov.

Abstract. The features of the interannual variability of the sea ice of the different closeness are investigated from 1969 to 2002 on the base of data BADC HadISST ICE. The cross-correlation connections between variability of the ice closeness, the air temperature at the Antarctic stations and the indexes of atmospheric circulation SOI (Southern oscillation) and AAO (Antarctic oscillation) are estimated. It is shown that maximal interannual variations are characteristic for the ices of the 90 – 100% closeness. It is noted that the maximal anomalies of the ice closeness in ENSO periods are observed in the Antarctic Peninsula region and Sodorzhestvo and Ross seas. The reaction on the El Niño events is most shown in the behavior of positive anomalies of the ice closeness. The high cross-correlation connections on the 95% level of statistical significance between SOI, AAO and ice closeness to the west of the Antarctic Peninsula are founded. The

inverse correlation between AAO and ice on the lag to one year to be observed, between SOI and ice – the direct correlation on the lag about 6 year. High inverse correlation with the zero lags is discovered between the air temperature and the ice closeness near the Antarctic stations.

Key words: interannual variability, ice conditions, ice closeness, Antarctic region, Southern oscillation index, Antarctic oscillation index.

Введение

Исследование пространственно-временной изменчивости антарктических морских льдов имеет важное значение для изучения реакции Южного океана на события Эль-Ниньо. Уже накоплен достаточно обширный объём знаний по этому вопросу. Еще в начале 20-го столетия Walker [1] предположил, что существует связь между Эль-Ниньо и процессами, происходящими в южных широтах. Hear, 1965 [2]; Gloersen, 1995 [3]; Джиганшин, 2003 [4] показали, что в изменении площади морских льдов Антарктики наблюдается периодичность в 2–4 года, близкая к периодам Эль-Ниньо. Обычно возникновение событий Эль-Ниньо связывают с экстремальными значениями индекса атмосферной циркуляции ЮК (Южного колебания). Chiu [5] по данным за 1973–1980 гг. обнаружил, что существует связь между значениями индекса ЮК в марте–апреле и площадью льда в июле–декабре. Связь между изменчивостью межгодовых аномалий ледовых полей Антарктики и Эль-Ниньо показана также Zwally, Parkinson, 1983 [6]. При этом сигнал в изменении аномалий льда, связанный с Эль-Ниньо, распространяется на восток. Carleton [7] по данным за 1929–1962 гг. обнаружил более низкую сплочённость льдов в море Уэдделла с декабря по январь в период события Эль-Ниньо.

Naо *et al.* [8] показали, что Эль-Ниньо проявляется в поведении морских льдов в море Росса, при этом они предположили, что первоначально на лёд в море Росса влияет западная часть тропиков Тихого океана и затем – восточная. Мощное влияние Эль-Ниньо с периодом около пяти лет на морской лёд в морях Росса и Уэдделла по данным за 1973–1989 гг. было обнаружено Xie *et al.* [9]. Авторы отметили также, что существует обратное влияние морского льда на аномалии температуры поверхности океана (ТПО) в тропиках Тихого океана.

Simmonds, Jacka [10], анализируя материалы за период с 1973 по 1992 гг., получили высокие положительные корреляции между изменчивостью морского льда и ЮК и показали, что результаты сильно варьируют в зависимости от сектора Антарктики. Они оценили связи между ЮК и морскими льдами для четырёх районов Антарктики: юго-западная часть Индийского океана, юго-западная и юго-восточная части Тихого океана и сектор к западу от моря Росса. Наиболее тесная связь между распространением льда и ЮК была выявлена для юго-восточной части Индийского океана и Австралийского сектора к западу от моря Росса. Было показано, что морской лёд в этих районах реагирует на изменения индекса ЮК с запаздыванием почти на год. Yuan, Martinson [11] нашли высокую корреляцию между Эль-Ниньо и аномалиями границы льдов в морях Амундсена, Беллинсгаузена и Уэдделла. Самые высокие корреляции, запаздывающие от Эль-Ниньо на 6 месяцев, проявляются в аномалиях распространения льдов между морями Амундсена и Росса (120–132° з.д.).

Проведенный краткий обзор показывает сложную природу связей между антарктическим морским льдом и Эль-Ниньо. Установлено, что они являются функцией сезона и сектора Антарктики. Представленные исследования в большинстве случаев базируются на данных за относительно короткий временной интервал, при этом анализируется изменчивость либо общей сплоченности льдов, либо их границы. Вместе с тем благодаря накоплению спутниковых измерений ряды наблюдений за морскими льдами становятся более длительными и подробными, с высокой пространственно-временной дискретностью. Это позволяет анализировать изменчивость морских льдов не только для их общей сплоченности, но и для различной балльности, оценить связь сплоченности льдов с изменчивостью метеорологических параметров.

Цель настоящей работы – исследовать особенности проявления межгодовых вариаций морских льдов разных сплочённостей на масштабах нескольких десятилетий, оценить корреляционные связи между изменчивостью сплочённости льдов, температуры воздуха на полярных станциях и индексов атмосферной циркуляции ЮК и ААК (Антарктического колебания). Особое внимание в работе уделяется региону Антарктического полуострова.

Материалы и методика

В работе были использованы данные British Atmospheric Data Center (BADC) HadISST ICE [12] о сплочённости морского льда в одноградусной сетке с 1969 по 2002 гг. и ряды наблюдений за температурой воздуха, полученные на антарктических станциях «Ак. Вернадский» (Украина), «Беллинсгаузен» (Россия), «Rothera» (Великобритания), «Magambio» (Аргентина), «Orcadas» (Аргентина), а также значения индексов ЮК и ААК.

Для всего Антарктического сектора Южного океана рассчитаны площади, занимаемые льдом различной балльности от 10 до 100%. За условную единицу площади принята площадь одноградусного квадрата, т.е. $1,2 \times 10^3$ км². Для каждого месяца (408 месяцев) вычислены среднемесячные аномалии этих площадей, а также среднегодовые аномалии за 34 года. Для аномалий площадей льда каждой балльности рассчитаны межгодовые среднеквадратические отклонения (СКО_{мес}). Для оценок связи межгодовой изменчивости ледовых условий с изменчивостью метеорологических параметров были рассчитаны взаимокорреляционные функции с 95%-ной статистической значимостью между межгодовыми вариациями среднегодовых рядов сплочённости морских льдов, температуры воздуха на станциях в регионе Антарктического полуострова и индексов атмосферной циркуляции ЮК и ААК.

Анализ результатов

Изменение по месяцам межгодового среднеквадратического отклонения аномалий площадей морских льдов разной балльности показывает, что наибольшие внутригодовые изменения СКО_{мес} наблюдаются для балльности льдов 90–100% (рис. 1).

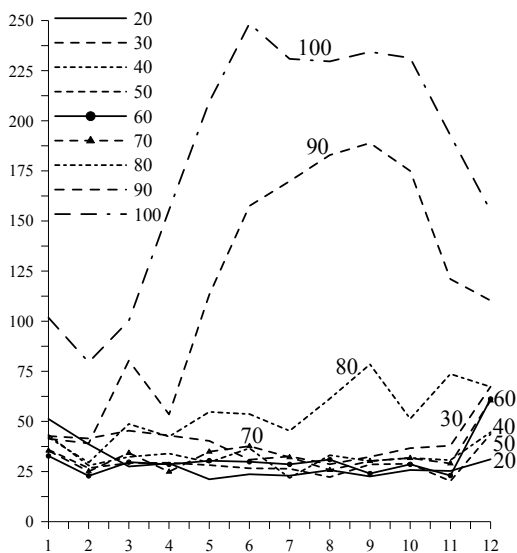


Рис. 1. Изменение по месяцам межгодовых среднеквадратических отклонений аномалий площадей морских льдов разной балльности (ед. $1,2 \times 10^3$ км²).

Минимальная межгодовая изменчивость отмечается в конце лета, в период максимального прогрева океана и минимального количества льда вокруг Антарктиды. В марте-апреле, в период интенсивного образования льда, происходит резкий рост $СКО_{\text{меж}}$, которые достигают максимума в июне для балльности 100% и в сентябре для балльности 80–90%. В октябре, когда лед начинает таять, межгодовая изменчивость снова уменьшается. Для льдов меньшей балльности (ниже 80%) эти закономерности не прослеживаются.

Анализ межгодовых изменений среднемесячных аномалий площадей морского льда 90–100%-ной балльности, рассчитанных для всего региона Антарктики, показывает, что все известные интенсивные Эль-Ниньо находят свое отражение в поведении сплоченности льдов. При этом для различных событий Эль-Ниньо это проявление происходит по-разному. Согласно [13], в течение 1969–1999 гг. было восемь интенсивных событий Эль-Ниньо. Периоды Эль-Ниньо (Э-1, ...) и Ла-Нинья (Л-1, ...) указаны на рисунке 2. Видно, что в межгодовой изменчивости ледовых условий для Антарктики в целом обнаруживаются признаки влияния каждого из этих Эль-Ниньо. Они проявляются в изменении амплитуды колебаний, продолжительности сезонов льдообразования и льдотаяния, форме сезонного сигнала, соотношения положительных и отрицательных аномалий в сезонном цикле. Отмечается следующая тенденция: бимодальная структура (наличие двух пиков) положительных аномалий во вторую половину года в периоды большинства Эль-Ниньо усиливается. В первое полугодие для отрицательных аномалий, вне зависимости от событий Эль-Ниньо или Ла-Нинья, характерен только один пик. В поведении положительных аномалий реакция на события Эль-Ниньо выражена более сильно, чем в поведении отрицательных. Например, в периоды Э-1, 2, 4, 6, 8, 9 отмечается значительное увеличение положительных аномалий, тогда как в периоды Э-3, 5, 7 аномалии уменьшаются.

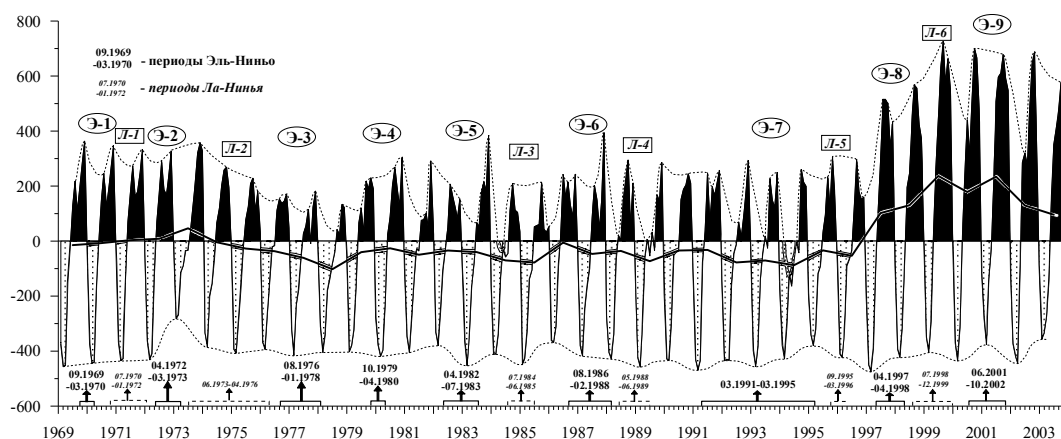


Рис. 2. Межгодовое изменение среднемесячных аномалий площадей морского льда 90%-ной балльности (ед. $1,2 \times 10^3 \text{ км}^2$). Жирная линия – среднегодовые аномалии.

Особенно большие значения положительных аномалий отмечаются в периоды двух последних Эль-Ниньо (Э-8, 9). Величины отрицательных аномалий в течение анализируемого временного интервала изменяются гораздо слабее. Тем не менее в последние фазы событий Э-2 и Э-7, между событиями Л-3 и Э-6, а также в период Э-9 наблюдается уменьшение абсолютных значений отрицательных аномалий.

Таким образом, величины положительных и отрицательных аномалий сплоченности морских льдов подвержены существенной межгодовой изменчивости, связанной с периодами Эль-Ниньо или Ла-Нинья. Вместе с тем на протяжении рассматриваемого периода в целом для Антарктики реакция льдов на разные события Эль-Ниньо проявляется по-разному. Кроме того, межгодовые вариации характеристик морского льда сильно зависят от сектора Антарктики [10,

13]. Так, рассчитанные нами разницы среднемесячных значений для льдов 100%-ной сплочённости между августом 2001 г. и августом 1994 г. (в годы, когда наблюдались экстремальные значения среднегодовых положительных и отрицательных аномалий балльности морского льда) показали, что максимальные межгодовые изменения наблюдаются в регионе Антарктического полуострова, морях Уэдделла, Росса и Содружества. Различные орографические условия, удалённость от основных источников генерации межгодового сигнала приводят к тому, что отклик на события Эль-Ниньо в разных районах Антарктики может существенно отличаться по форме сигнала, его амплитуде и фазе.

Анализируемый нами межгодовой ход аномалий сплочённости морских льдов для Антарктики в целом является сложной суперпозицией сигналов различных регионов вокруг Антарктиды, которые по-разному реагируют на процессы, протекающие в тропических зонах Мирового океана. В ряде работ показано, что реакция ледового покрова на события Эль-Ниньо в отдельных районах может существенно запаздывать [8–11]. В связи с этим полученная нами квазисинхронная реакция аномалий сплочённости льда в целом для Антарктики на конкретные события Эль-Ниньо не означает синхронной связи этих процессов в отдельных регионах Антарктики, а может быть откликом льдов на более ранние события.

Рассмотрим более подробно особенности проявления межгодовых вариаций морских льдов в регионе Антарктического полуострова, их корреляционные связи с температурой воздуха на полярных станциях и индексами атмосферной циркуляции ЮК и ААК. На рисунке 3 представлены межгодовой ход индексов ЮК и ААК, температуры воздуха на станции «Академик Вернадский», расположенной западнее Антарктического полуострова, и сплочённости льда в узле регулярной сетки, наиболее приближенном к этой станции.

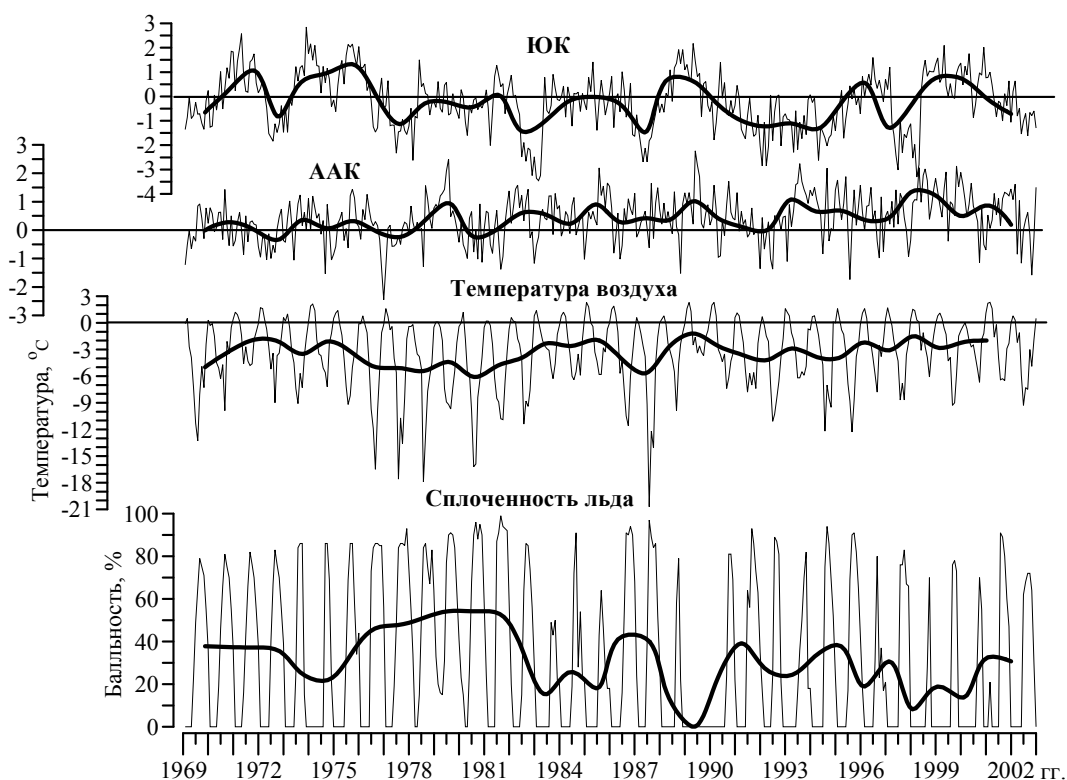


Рис. 3. Межгодовой ход индексов ЮК, ААК, температуры воздуха на станции «Академик Вернадский» и сплочённости льдов в точке 65° з.д. и 64° ю.ш.

Жирные линии – среднегодовые значения.

Так же, как и для Антарктики в целом, временные ряды сплочённости льдов и температуры воздуха в районе станции «Академик Вернадский» показывают интенсивную межгодовую изменчивость этих характеристик. В то же время прямую связь между изменчивостью льда, температуры воздуха и индексов атмосферной циркуляции визуально установить сложно. Расчет взаимокорреляционных функций показал, что между этими параметрами значимая связь существует. Так, наблюдается связь при сдвиге в 6 лет между индексами атмосферной циркуляции ЮК и ААК с коэффициентом корреляции $R \sim -0,40$, между ЮК и льдом в районе станции – с $R \sim 0,65$. Между ААК и сплочённостью льда, температурой воздуха на станции «Академик Вернадский» и сплочённостью льда наблюдается обратная корреляция с величинами R соответственно $-0,50$ и $-0,80$ при отсутствии временного сдвига.

Высокие значения R получены также между температурой воздуха на станциях «Беллингаузен» и «Rothera» ($R \sim -0,76$), станциях «Orcadas» и «Marambio» ($R \sim -0,65$) и сплочённостью льда в районе станции «Академик Вернадский».

Анализ структуры корреляционных связей для региона Антарктического полуострова указывает на их существенную пространственную неоднородность (рис. 4).

Значимые корреляционные связи между ЮК, ААО и сплочённостью антарктического льда наблюдаются к западу от Антарктического полуострова, при этом максимальная корреляция между ААО и льдом ($R \sim -0,60$) отмечается на сдвиге до одного года, а между ЮК и льдом ($R \sim 0,65$) – на сдвиге около 6 лет.

Наиболее тесные связи ($R \sim -0,55 \dots -0,60$) между ААО и сплочённостью льда отмечаются в зоне Южной ветви Антарктического циркумполярного течения (ЮВ АЦТ). Язык высоких значений коэффициентов корреляции вытягивается в восточном – северо-восточном направлении вдоль струи ЮВ АЦТ. Судя по конфигурации изолинии $-0,55$, наблюдается реакция на межгодовые колебания Антарктического индекса льдов, выносимых ЮВ АЦТ из моря Беллингаузена в пролив Дрейка и южную часть моря Скотия. Нулевые значения сдвига свидетельствуют о том, что для среднегодовых значений анализируемых параметров эта связь практически квазисинхронна.

Распределение величин R между ЮК и сплочённостью морских льдов показывает ту же пространственную особенность – наличие максимальной связи между этими параметрами в зоне выноса льда Южной ветвью АЦТ из моря Беллингаузена. В отличие от ААК, реакция льдов на ЮК запаздывает почти на 6 лет.

К востоку от Антарктического полуострова также выявлена значимая отрицательная корреляция между ААК и льдом, при этом абсолютные значения R меньше 0,4. В северо-западной части моря Уэдделла временной сдвиг между колебаниями ААК и реакцией льдов составляет 3–4 года, а на юге сдвиг практически не наблюдается. Между ЮК и льдом коэффициенты корреляции восточнее Антарктического полуострова низкие, а временной сдвиг достигает десятков лет, что свидетельствует о незначимости связи между Южным колебанием и льдами в западной части моря Уэдделла.

Выводы

Анализ межгодовых вариаций сплочённости антарктических морских льдов за период с 1969 по 2003 г. показал, что максимум межгодовой изменчивости относится ко льдам 90–100%-ной сплочённости. Отмечено, что наибольшие аномалии сплочённости льда в периоды Эль-Ниньо наблюдаются в регионе Антарктического полуострова, в морях Содружества и Росса.

Наблюдается существенное изменение межгодового $СКО_{\text{меж}}$ аномалий площадей льдов разной балльности для различных месяцев года. Показано, что реакция на события Эль-Ниньо наиболее выражена в поведении положительных аномалий сплочённости льда.

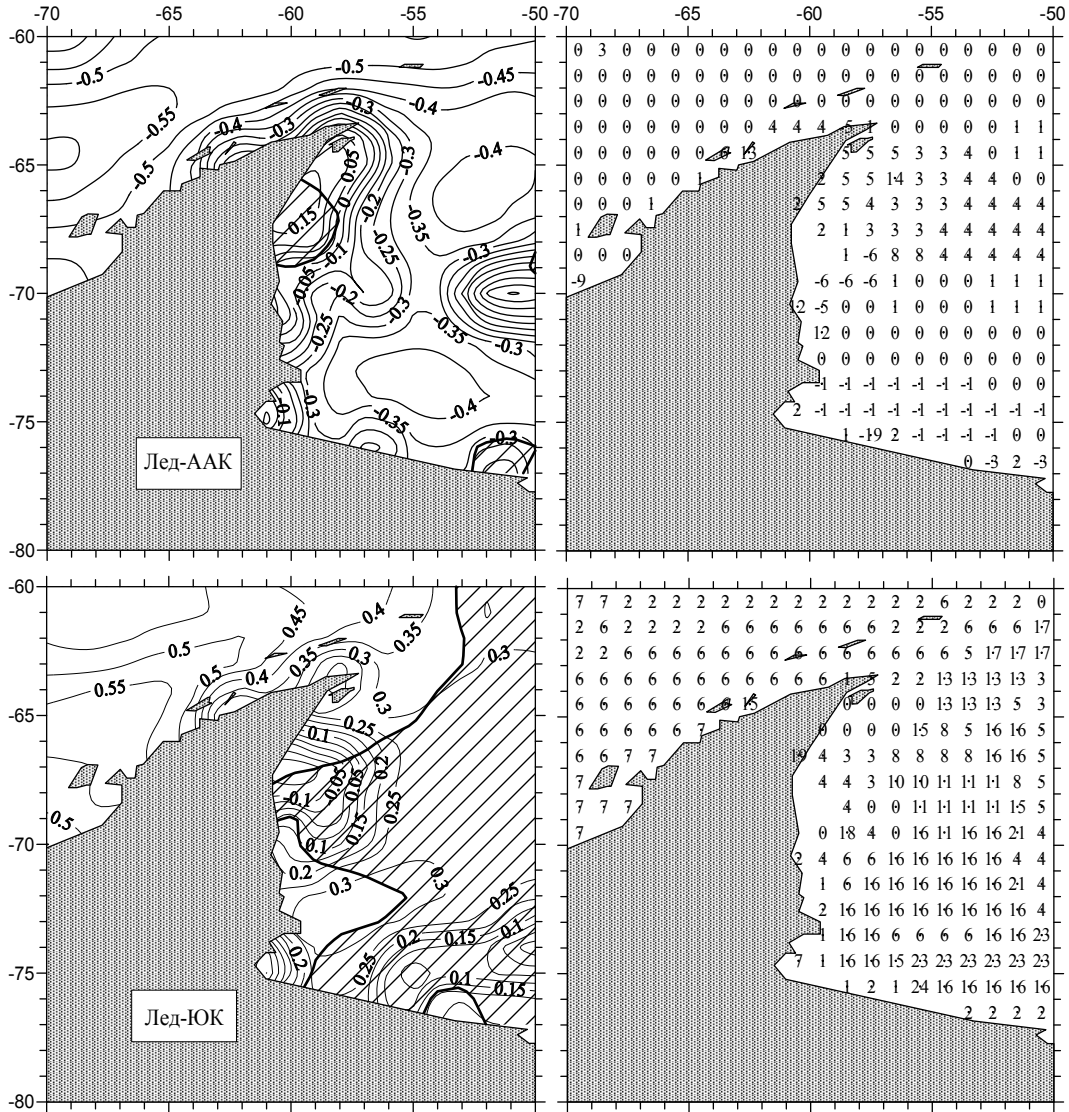


Рис. 4. Значения коэффициентов корреляции (слева) между среднегодовыми значениями балльности льдов, индексами ААК (вверху) и ЮК (внизу), и величина сдвига (справа). Заштрихованные области – районы, где коэффициенты корреляции не значимы на 95%-ном уровне.

Установлены высокие, значимые на 95%-ном уровне корреляционные связи между ЮК, ААК и сплочённостью льдов к западу от Антарктического полуострова. Между ААК и льдом отмечается обратная корреляция на сдвиге до одного года, а между ЮК и льдом – прямая на сдвиге около шести лет. Высокая обратная корреляция с нулевым сдвигом выявлена для температуры воздуха и балльности льда в точках, расположенных вблизи полярных станций.

Литература

1. **Walker G.T.** Correlation in seasonal variations of weather VIII. Memorandum of the Indian Meteorological Department. Indian Meteorological Department, 1923. – P. 75–131.
2. **Heap J.A.** Antarctic pack ice. In Antarctica, Hatherton T (ed.), 1965. – Praeger. – P. 187–196.
3. **Gloersen P.** Modulation of hemispheric sea-ice cover by ENSO events // Nature, 1995. – 373.– P. 503–506.
4. **Джиганшин Г.Ф.** Сезонные и межгодовые вариации границы дрейфующих льдов в Атлантическом секторе Антарктики и проливе Дрейка // Морской гидрофизический журнал, 2003. – № 3. – С. 68–80.
5. **Chiu L.S.** Variation of Antarctic sea ice: an update // Monthly Weather Review, 1983. – 111.– P. 578–580.
6. **Zwally H.J., Parkinson C.L., Comiso J.C.** Variability of Antarctic sea ice and carbon dioxide // Science, 1983. – 220. – P. 1005–1012.
7. **Carleton A.M.** Sea ice atmosphere signal of the southern oscillation in the Weddell Sea, Antarctica // Journal of Climate, 1988. – 1. – P. 379–388.
8. **Hao C.J., Zhang L., Xue H., Xie S.M.** Antarctic sea ice and ENSO event // Acta Oceanolog. Sinica, 1990. – 12. – P. 549–561.
9. **Xie S.M., Bao C., Xue Z., Zhang L., Hao C.J.** Interaction between Antarctic sea ice and ENSO events // Proceedings of NIPR Symposium on Polar Meteorology and Glaciology, 1994. – P. 95–110.
10. **Simmonds I., Jacka T.H.** Relationships between the interannual variability of Antarctic sea ice and the southern oscillation // Journal of Climate, 1995. – 8. – P. 637–647.
11. **Yuan X.J., Martinson D.G.** Antarctic sea ice extent variability and its global connectivity // Journal of Climate, 2000. – 13. – P. 1697–1717.
12. **CD-ROM Data Set.** – British Atmospheric Data Center (BADDC) HadISST ICE. – 2003.
13. **Turner J.** Review the El Niño – Southern Oscillation and Antarctica // Int. J. Climatology, 2004. – № 24. – P. 1–31.