

## МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ КРОМКИ ЛЬДА В ЮЖНОМ ОКЕАНЕ

*Е.А. Базюра, А.Б. Полонский,  
А.В. Юровский*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: bazyura@yahoo.com

*На основе ежемесячных данных реанализа NCEP за 1950 – 2001 гг. исследованы тренды смещения границы кромки льда в Южном океане в зимний период.*

**Введение.** Морской лед является одним из важнейших факторов, определяющих состояние климатической системы. Он занимает ~ 7 % поверхности земли и, находясь на границе раздела вода – воздух, влияет на потоки тепла, массы и импульса между океаном и атмосферой. Это, в свою очередь, отражается на условиях формирования и вентиляции глубинных и придонных вод, и, следовательно, влияет на меридиональную термохалинную циркуляцию. Имеется ряд публикаций, указывающих на важную регулируемую роль состояния ледовитости морей в климатической изменчивости на масштабах от десятилетий до тысячелетий [1 – 4]. В этой связи изучение низкочастотной изменчивости характеристик морского ледового покрова и, в частности, ледового покрова Антарктики, несомненно, представляется актуальным.

Имеющиеся публикации, к сожалению, не дают однозначного ответа на вопрос о тенденциях изменения ледовитости в Южном океане. Например, в ряде работ получены тенденции увеличения площади ледового покрова в Антарктике. Так, авторы работы [5] приходят к выводу, что в период с октября 1978 г. по август 1987 г. граница кромки льда в Южном океане сдвигалась к экватору со скоростью  $0,011^\circ$  широты/год. В [6] также получено смещение границы кромки льда к северу за периоды 1982 – 1998 и 1982 – 2004 гг. Скорость смещения составляет  $0,01$  и  $0,001^\circ$  широты/год

соответственно. Положительные тренды площади распространения морского льда в Антарктике получены и в работах [7 – 9]. По этим оценкам для периодов 1987 – 1996, 1978 – 1996, 1979 – 1998 гг. величины трендов составляют  $0,43 \cdot 10^5$ ,  $0,14 \cdot 10^5$  и  $0,11 \cdot 10^5$  км<sup>2</sup>/год соответственно. В то же время в [10] на основе спутниковых данных за 30 лет (1972 – 2002 гг.) получен противоположный результат. Авторы [10] утверждают, что площадь распространения морского льда уменьшается со скоростью  $0,15 \cdot 10^5$  км<sup>2</sup>/год. Заметим, что вышеприведенные оценки получены на основе обработки достаточно разнородных данных прямых измерений (корабельные измерения, данные аэрофотосъемок и, частично, начиная с 80-х годов прошлого столетия, спутниковые данные). Это отчасти объясняет количественные различия в оценках. Другая причина различий объясняется, по-видимому, тем, что авторы цитируемых работ использовали выборки различной длины (от 9 до 30 лет).

Цель данной работы: выявить особенности межгодовой изменчивости положения границы кромки льда в Антарктическом регионе в зимний сезон (июль – сентябрь) на базе данных реанализа по явным турбулентным потокам тепла. Граница раздела между областями положительных и отрицательных знаков турбулентных потоков тепла (Н) через поверхность океана косвенно указывает на положение границы льда высокой сплоченности.

**Характеристика использованного материала и методика его обработки.** В работе были использованы ежемесячные данные реанализа NCEP по турбулентным явным потокам тепла за 1950 – 2001 гг. Величины потоков представлены в узлах гауссовской сетки со средним шагом по широте и долготе  $1,9^\circ$  и  $1,875^\circ$  соответственно. По этим данным рассчитывались следующие величины:

– положение границы кромки льда в Антарктическом регионе в зимний период, как границы раздела между областями положительных и отрицательных Н;

– линейные тренды изменения положения границы кромки льда.

**Результаты и их анализ.** Общий характер трендов в каждом из трех секто-

ров Южного океана принципиально различен. Поэтому характеристику трендов по каждому сектору дадим отдельно. Долготное распределение трендов смещения границы кромки льда в Южном океане для зимнего сезона (1950 – 2001 гг.) представлено на рис. 1.

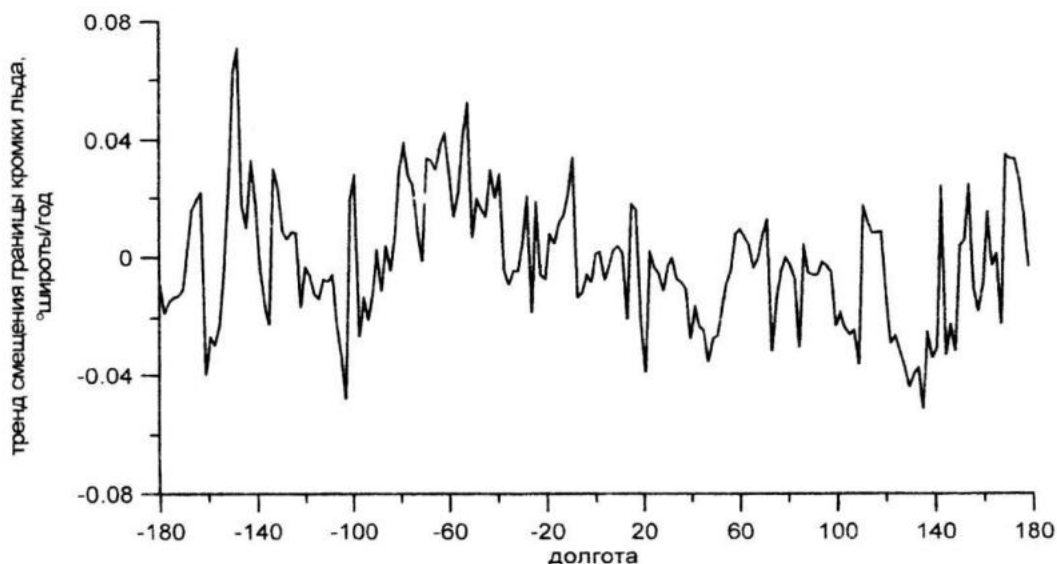
*Тихоокеанский сектор (150° в.д. – 70° з.д.).* При осреднении по сектору получен положительный тренд 0,003° широты/год, уровень значимости которого не превышает 85 %. Вместе с тем, можно выделить отдельные области, где значимость трендов  $\geq 85$  %. В центральной и западной частях Тихоокеанской зоны Южного океана тренды смещения границы кромки льда, преимущественно, положительные. Максимум отмечается на 150° з.д., где величина тренда составляет 0,076° широты/год, а уровень значимости – 95 %. В восточной части получены отрицательные тренды, с минимумом на 105° з.д. (-0,045° широты/год).

*Атлантический сектор (70° з.д. – 20° в.д.).* Средний по всему сектору тренд составляет 0,009° широты/год, что свидетельствует о сдвиге границы кромки льда к экватору. Полученный тренд значим на уровне 90 %. Значимый на уровне 87 % тренд смещения границы кромки льда к северу выявлен на стыке Тихоокеанского и Атлантического секторов (80° з.д. – 40° з.д.) с максимумом на 55° з.д. Величина тренда здесь превышает 0,05° широты/год. В остальных зо-

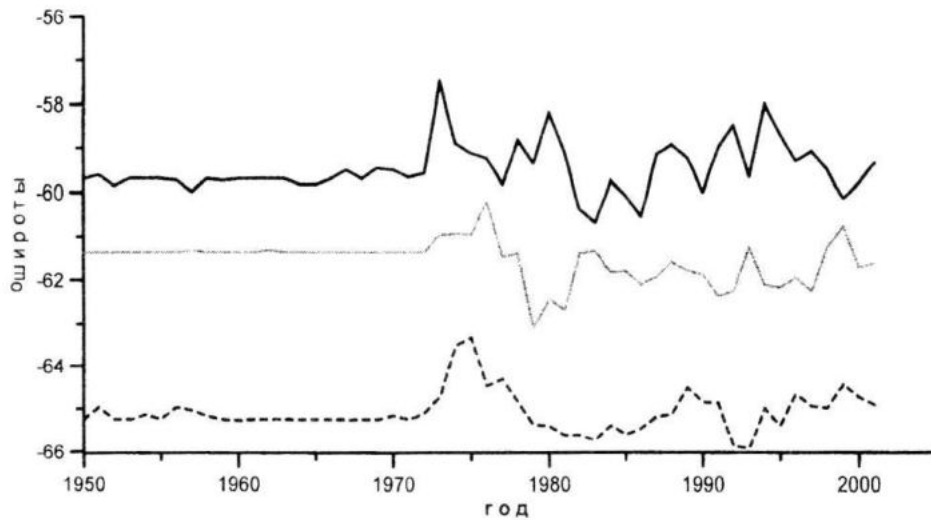
нах Атлантического региона тренды не значимы на уровне 85 %.

*В Индоокеанском секторе (20° в.д. – 150° в.д.)* граница кромки льда сдвигается на юг в среднем со скоростью 0,012° широты/год, тренд значим на уровне 95 %. Наибольшая отрицательная величина тренда отмечается в зоне 120° в.д. – 140° в.д. и в среднем по этой области составляет -0,033° широты/год, а уровень значимости тренда – 95 %.

Как следует из рис. 1, график распределения трендов, вычисленных вдоль периметра Южного океана по данным за пятидесятилетний период, сильно зашумлен, что трудно объяснить пространственной изменчивостью физико-географических условий региона. Скорее это объясняется качеством исходного материала. Действительно, графики межгодовых вариаций границы кромки льда, вычисленные для каждого из трех секторов региона (рис. 2), указывают на их «стабильное» положение до 1972 г. и существенную изменчивость после 1972 г. На наш взгляд, эту особенность графиков можно объяснить только различным количеством и качеством данных, усвоенных в реанализе NCEP за эти периоды, поэтому нельзя с полной уверенностью утверждать, что описанные выше тренды соответствуют процессам, в действительности происходившим в Антарктическом регионе.



Р и с. 1. Долготное распределение трендов смещения границы кромки льда в Южном океане для зимнего сезона (1950 – 2001 гг.). Отрицательные величины трендов соответствуют смещению на юг, положительные – смещению на север



Р и с. 2. Изменчивость положения границы кромки льда в секторах Южного океана в зимний период. Черная кривая: Атлантический сектор ( $70^{\circ}$  з.д. –  $20^{\circ}$  в.д.); серая кривая: Индоокеанский сектор ( $20^{\circ}$  з.д. –  $150^{\circ}$  з.д.); пунктир: Тихоокеанский сектор ( $150^{\circ}$  в.д. –  $70^{\circ}$  з.д.)

Начиная с 1981 г., реанализ NCEP использует данные спутниковых наблюдений. Следовательно, для этого периода наиболее соответствующие реальным процессам тенденции изменения положения границы кромки льда целесообразно выявить лишь по данным NCEP за период, охватывающий время после 1981 г., что и было сделано. Ясно, что такая характеристика климатической изменчивости, как тренд, очень чувствительна к периоду, за который она определяется. Поэтому при изменении периода, за который вычисляется тренд, его знак, величина и уровень могут изменяться.

При исследовании изменчивости положения границы кромки льда для зимнего сезона (июль – сентябрь) периода 1981 – 2001 гг. выявлено, что средний по всему Антарктическому региону тренд сдвига границы кромки льда к северу значим на уровне 95 % и составляет  $0,031^{\circ}$  широты/год.

При осреднении по Индоокеанскому и Атлантическому секторам получены тренды, уровень значимости которых  $< 85\%$ . А, полученный при осреднении по Тихоокеанскому сектору, тренд сдвига границы кромки льда к северу составляет  $0,040^{\circ}$  широты/год, он значим на уровне 95 %.

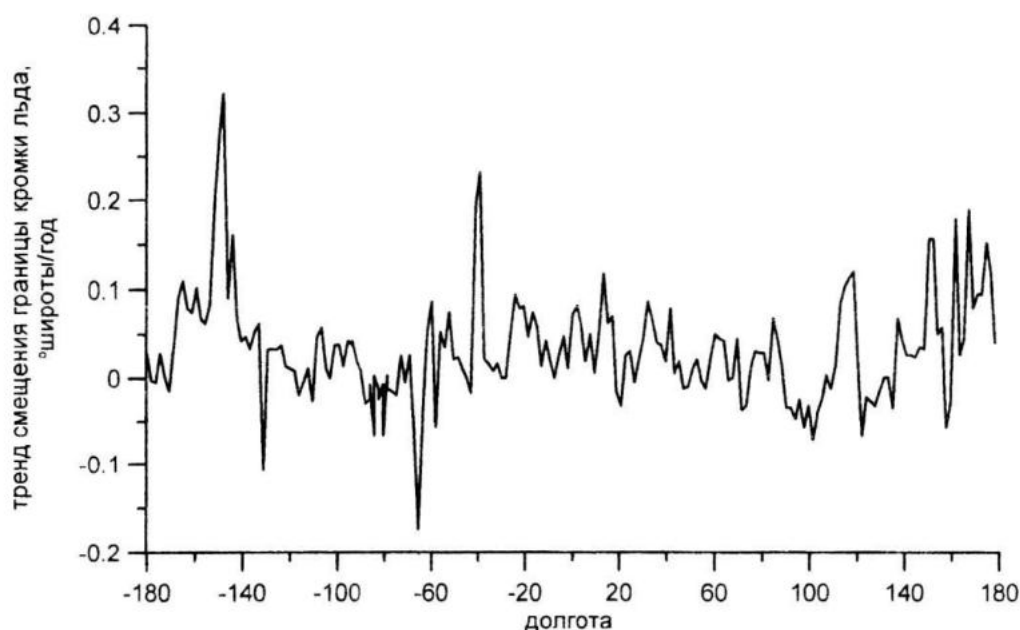
Рассмотрим пространственное распределение трендов в каждом секторе

более детально (рис. 3). В центральной и западной частях Тихого океана, как и в случае осреднения за период 1950 – 2001 гг., отмечаются значимые положительные тренды с максимумом на  $145^{\circ}$  з.д. (величина тренда  $0,32^{\circ}$  широты/год, уровень значимости более 95 %). Тренды в восточной части Тихоокеанского сектора невелики и не значимы на уровне 85 %. В проливе Дрейка отмечается отрицательный тренд, он составляет  $0,18^{\circ}$  широты/год (значим на уровне 90 %). Похожая картина наблюдается в Атлантическом секторе. В целом, по сектору имеет место положительный тренд с максимумом в западной части сектора (море Уэддела). Здесь на  $40^{\circ}$  з.д. получен значимый на уровне 95 % тренд, величина которого составляет  $0,23^{\circ}$  широты/год. В западной части Индоокеанского сектора тренды, преимущественно, положительные с величинами  $\leq 0,1^{\circ}$  широты/год. В восточной части имеются области, где тренды отрицательные, не превышающие  $0,05^{\circ}$  широты/год, их значимость невелика – 85 %.

Для того, чтобы ответить на вопрос, насколько адекватно наши результаты отражают характер межгодовой изменчивости положения границы кромки льда, сравним их с результатами, полученными другими авторами, например, в работе [6]. В ней по данным спутниковых наблюдений для зимнего сезона периода 1982 – 1998 гг. исследованы линейные тренды сдвига границы кромки льда сплоченностью 30 %. Кроме того, авторами [6] выбраны следующие границы рассматривае-

мых областей: Южный океан, Индоокеанский сектор (20° в.д. – 90° в.д.), Тихоокеанский сектор (90° в.д. – 160° в.д.), море Росса (160° в.д. – 140° з.д.), море Уэдделла (60° з.д. – 20° в.д.), моря Беллинсгаузена и Амундсена (60° з.д. – 140° з.д.). Для адекватного сравнения нами были пересчитаны тренды для вышеуказанных областей и периода. Результаты сравнения приведены в табл. 1. Сопоставление показывает, что в Индоокеанском секторе тренды противоположны по знаку, хотя и совпадают по величине, причем уровень значимости тренда невысок (менее 85 %). Во всех остальных регионах, знаки трендов положительны и совпа-

дают, хотя величины трендов различаются, причем в некоторых областях значительно. Например, для всего Южного океана и Моря Уэдделла (где тренды значимы уровне 95 %), величины трендов расходятся в несколько раз. Совпадение знаков трендов может служить подтверждением достоверности результатов, полученных в данном исследовании. Численные расхождения объясняются тем, что в работе [6] исследуется граница плавающих льдов сплоченностью 3 балла, которые под воздействием течений и ветра выносятся в открытую часть океана на значительные расстояния от ледовых границ высокой сплоченности.



Р и с. 3. Долготное распределение трендов смещения границы кромки льда в Южном океане для зимнего сезона (1981 – 2001 гг.). Отрицательные величины трендов соответствуют смещению на юг, положительные – смещению на север

Т а б л и ц а 1

Сравнение линейных трендов смещения границы кромки льда по результатам [6] (колонка 2) и трендов, полученных с использованием величин явных потоков тепла из реанализа NCEP (колонки 3 и 4)

Регион	Тренд смещения границы кромки льда, °широты/год	Тренд смещения границы кромки льда, °широты/год	Уровень значимости тренда, %
1	2	3	4
Южный океан	0,003±0,004	0,03	95
Индоокеанский сектор (20° в.д. – 90° в.д.)	0,03±0,02	-0,03	85
Тихоокеанский сектор (90° в.д. – 160° в.д.)	-0,02±0,022	-0,007	85
Море Росса (160° в.д. – 140° з.д.)	0,05±0,04	0,037	85

1	2	3	4
Море Уэдделла (60° з.д. – 20° в.д.)	0,04±0,03	0,083	95
Моря Беллинсгаузена и Амундсена (140° з.д. – 60° з.д.)	0,07±0,09	0,005	85

**Выводы.** 1. Данные NCEP по турбулентным явным потокам тепла дают адекватную информацию о вариациях положения границы кромки льда только начиная с 80-х годов XX века, т.к. начиная с этого времени реанализ базируется на данных спутниковых измерений.

2. При исследовании изменчивости положения границы кромки льда для зимнего сезона (июль – сентябрь) в период 1981 – 2001 гг. выявлено, что средний по всему Южному океану тренд сдвига границы кромки льда к северу значим на уровне 95 % и составляет 0,031°широты/год.

3. При осреднении по Индоокеанскому и Атлантическому секторам получены тренды, уровень значимости которых < 85%. Полученный при осреднении по Тихоокеанской части Южного океана тренд сдвига границы кромки льда к северу составляет 0,040°широты/год, он значим на уровне 95 %.

4. Совпадение знаков трендов на большей части исследуемой акватории, полученное при сравнении результатов данной работы с результатами работы [6], может служить подтверждением достоверности результатов данного исследования. Численные же расхождения объясняются тем, что в [6] исследуется граница плавающих льдов сплоченностью 3 балла, которые под воздействием течений и ветра выносятся в открытую часть океана на значительные расстояния от ледовых границ высокой сплоченности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fletcher J.O.* Ice extent in the southern oceans and its relation to world climate // *Journal of Glaciology*, 1969. – 15. – P. 417 – 427.
2. *Walsh, J.E.* The role of sea ice in climate variability // *Theories and Evidence, Atmosphere-Ocean*, 1983. – 21 (3). – P. 229 – 242.
3. *Clark P.U., Pisas N.G., Stocker T.F., and Weaver A.J.* The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change // *Nature*, 2002. – 415. – P. 863 – 869.
4. *Hanna E.* The role of Antarctic sea ice in global climate change // *Progress in Physical Geography* 1996. – 20 (4). – P. 371 – 401.
5. *Yuan X., Martinson D.G.* Antarctic sea ice extent variability and its global connectivity // *Journal of Climate*, 2000. – 13. – P. 1697 – 1717.
6. *Shailendra Rai, Pandey A.C.* Antarctic sea ice variability in recent years and its relationship with Indian Ocean Sea Surface Temperature // *The Journal of Indian Geophysical Union*, 2006. – 10 (3). – P. 219 – 229.
7. *Watkins A.B., Simmonds I.* Current Trends in Antarctic Sea Ice: The 1990s Impact on a Short Climatology // *Journal of Climate*, 2000. – 13. – P. 4441 – 4451.
8. *Zwally H. J., Comiso J.C., Parkinson C.L., Cavalieri D.J., Gloersen P.* Variability of Antarctic sea ice 1979 – 1998 // *Journal of Geophysical Research*, 2002. – 107 (C5). – 3041, doi:10.1029/2000JC000733.
9. *Cavalieri D.J., Gloersen P., Parkinson C.L., Comiso J.C., Zwally H.J.* Observed hemispheric asymmetry in global sea ice changes // *Science*, 1997. – 278. – P. 1104 – 1106.
10. *Cavalieri D.J., Parkinson C.L.* 30 – year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic decadal sea ice variability // *Geophysical Research Letters*, 2003. – 30 (18). – 1970, doi:10.1029/2003GL018031.