

# УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ АНОМАЛЬНОГО РАСПРЕСНЕНИЯ В СЕБ

*А.Е. Вязилова<sup>1,2</sup>, А.В. Смирнов<sup>1,2</sup>*

*<sup>1</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,  
Санкт-Петербург;*

*<sup>2</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации;  
vae@aari.ru; avsmir@aari.ru*

## Введение

Сокращение морского ледяного покрова, наблюдаемое в настоящее время в Арктике, сопровождается перераспределением морского льда и содержания пресной воды в верхнем слое [17] и влияет на их объем и пути выноса из Арктики.

Считается, что формирование соленостных аномалий (СА) в западной части Северо-Европейского бассейна (СЕБ) в основном является результатом выноса морских льдов и пресной воды через пролив Фрама [9, 19]. Вынос через проливы Канадского Арктического архипелага имеет меньшее значение для образования СА, за исключением 1990-х гг. [11], но, по мнению других авторов [5], СА как 1980-х, так и 1990-х гг. сформировались в результате выноса через проливы Канадского Арктического архипелага.

За летними потеплениями в Арктике следуют отрицательные аномалии солености в Северной Атлантике. Наиболее известная из них — «Великая соленостная аномалия (ВСА)» [8] наблюдалась в 1970-х гг. Другие СА были отмечены в 1980-х [5] и 1990-х гг. [6]. СА, наблюдавшиеся в 1968–1970 и 1980–1982 гг., связывались с увеличением экспорта морского льда через пролив Фрама [27]. Выносу морского льда через проливы Канадского Арктического архипелага придается меньшее значение в формировании СА, за исключением СА 1990-х гг. [11].

В последнее десятилетие произошло перераспределение запаса пресных вод, одной из причин которого является увеличение притока воды из Северной Атлантики в Арктический бассейн, приведшее к подъему верхней границы слоя атлантических вод в Евразийском бассейне и смещению распресненных вод в Канадский бассейн. Другие причины – это преобладание в Арктике антициклонического режима, который привел к росту запаса пресных вод в Канадском бассейне [21], и отток пресных вод, поступивших с Евразийским речным стоком, в круговорот моря Бофорта в результате наблюдаемой циклонической циркуляции в атмосфере над Арктическим бассейном [18].

Предполагается, что увеличение содержания пресных вод у Канадского Арктического архипелага способствует наблюдаемому усилению выноса морских льдов и пресной воды через проливы архипелага [15], а также через пролив Фрама [24].

Увеличение значений индекса Северо-атлантического колебания (САК) (начиная с 1976 г.) сопровождалось увеличением годового выноса льда в Гренландское море на  $200 \text{ км}^3$  [9]. Усиление выноса морских льдов через пролив Фрама является одним из показателей уменьшения площади льда в Арктическом регионе [23], и весенний вынос морского льда объясняет около 10 % изменчивости сентябрьской площади льда в Северном полушарии [13].

В данной работе проведен сравнительный анализ температуры воздуха, солёности вод в верхнем слое, сплоченности льда, выноса льда через пролив Фрама, погодных условий, характерных для 1950–1960-х гг. и современного периода, выполнена оценка возможности появления новой интенсивной солёностной аномалии в субарктической Северной Атлантике.

### **Данные и методы анализа**

Для исследования использованы данные Национального центра снега и льда (NSIDC, США) [20], массивов NCEP/NCAR [14] (температура воздуха, давление на уровне моря, скорость ветра, зональная и меридиональная составляющие скорости ветра), HADISST (сплоченность льда) [22].

По данным массива NCEP/NCAR были рассчитаны летние (июнь-август) аномалии температуры воздуха для Арктического

региона 75–90° с. ш., построены карты аномалий скорости ветра, зональной составляющей скорости ветра за декабрь–февраль 1950–1969, 2000–2015 гг. [10].

По данным массива HADISST были рассчитаны средние за десятилетия сплоченности льда (март, сентябрь). По данным NSIDC были рассчитаны средние за месяц и среднегодовые площади льда в Гренландском море, море Баффина.

В работе также были использованы материалы «Климатологического Атласа Северо-Европейского бассейна и северной части Северной Атлантики» [16], созданного совместными усилиями ФГБУ «ААНИИ», Геофизического Института Бергена, Норвегия, и Национальным центр океанографических данных, США. Средние за десятилетия климатологические распределения аномалий солёности в верхнем слое были рассмотрены для изучения влияния притока пресных вод из Арктики на формирование термохалинных аномалий в СЕБ и северо-западной части Северной Атлантики.

Для расчета средней за месяц площади выноса морского льда и аномалий среднегодовой площади выноса морского льда в проливе Фрама использовались данные массива NCEP/NCAR. Расчет проводился по формуле [23]:

$$F_{ice} = 8737\Delta P + 24562, \quad (1)$$

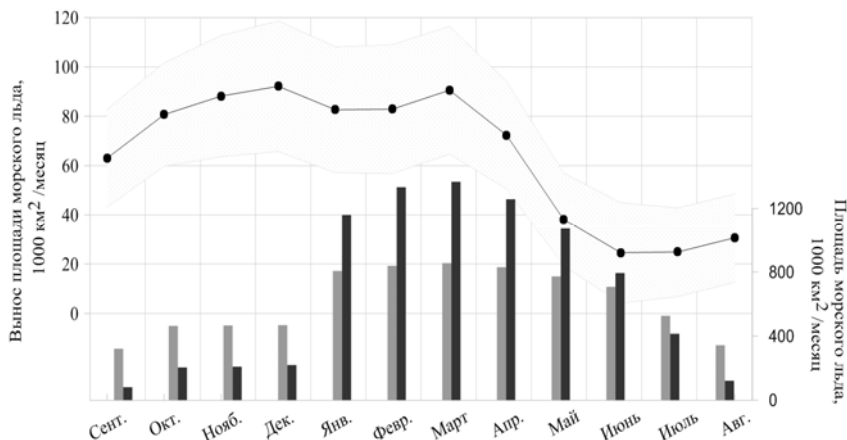
где  $F_{ice}$  – площадь выноса морского льда;  $\Delta P$  – разница давления над уровнем моря между 25° з. д. и 5° в. д.

## Результаты

В сентябре площадь морского льда достигает минимума, и затем следует его постепенное нарастание. Максимальное количество льда наблюдается в марте (рис. 1). Основной вынос морского льда через пролив Фрама происходит с сентября по апрель, тогда как в летний сезон вынос льда наименьший. Анализ среднегодовых значений площади выноса морского льда в проливе Фрама показывает увеличение выноса в последние две декады. Также увеличенный вынос льда наблюдался в 1950-х и начале 1960-х годов.

Вынос больших объемов льда в СЕБ приводит к резкому изменению гидрологического режима региона. В [13] авторы

связывают увеличение выноса морского льда с ростом температуры воздуха, который привел к уменьшению толщины льда и увеличению его подвижности [7, 25], а также с усилением скорости ветра в Арктическом регионе. В [2] показана тесная взаимосвязь между увеличением экспорта морского льда и периодами усиления северных ветров в 1960-х годах.

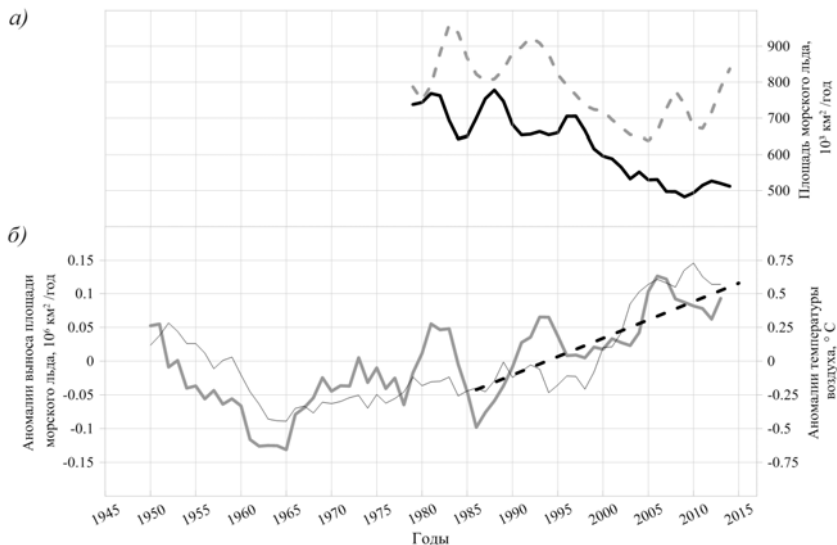


**Рис. 1. Среднемесячный вынос площади морского льда в проливе Фрама [19], площадь морского льда (колонки серого цвета – в Гренландском море, черного – в море Баффина).**

На рис. 2 временная изменчивость летних температур в Арктике частично согласуется с межгодовыми изменениями выноса морского льда через пролив. Одновременно с наблюдающимся ростом выноса морского льда, в Гренландском море и в море Баффина общая площадь морского льда заметно уменьшается, что связано с общим повышением приземной температуры воздуха в регионе.

Длительные (более пяти лет) периоды усиления северной составляющей ветра в северной части СЕБ 1960-х гг. по срокам совпадают с усилением выноса полярных вод и льдов через пролив Фрама. Интенсивный вынос морского льда и распресненных вод наблюдался в 1960-х гг. вследствие летнего потепления и

длительного (более пяти лет) периода усиления северной составляющей ветра [19], в результате чего в 1970-х гг. на акватории Северной Атлантики наблюдалась ВСА [2].

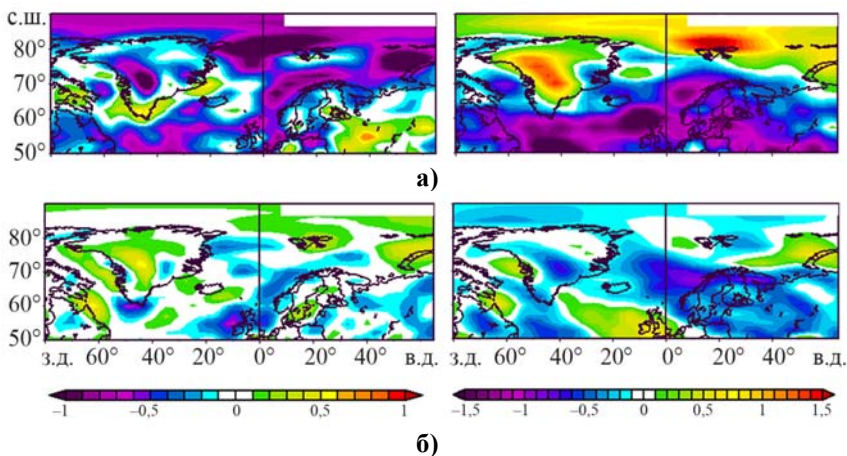


**Рис. 2. Площадь морского льда (скользящее среднее за 3 года) в Гренландском море (черная линия) и в море Баффина (пунктирная линия) (а); аномалии летней температуры воздуха (скользящее среднее за 5 лет) в Арктическом регионе по данным NCEP/NCAR (серая линия), аномалии выноса площади морского льда (скользящее среднее за 5 лет) в проливе Фрама (жирная линия), линейный тренд аномалий выноса площади морского льда (черная пунктирная линия) за 1985–2015 гг. (б).**

В настоящее время наблюдается накопление пресных вод в круговороте Бофорта как следствие увеличенного притока атлантических вод в Арктику [1, 12] и поднятия их верхней границы. В [3, 4] изменение объема пресных вод рассматривается как результат изменения толщины слоя вод с соленостью меньше 34,8 ‰ и изменения средней солености в этом слое. На уменьшение солености в Американо-Североатлантическом суббассейне повлияли два фактора: увеличение поступления тихоокеанских вод, соленость которых меньше

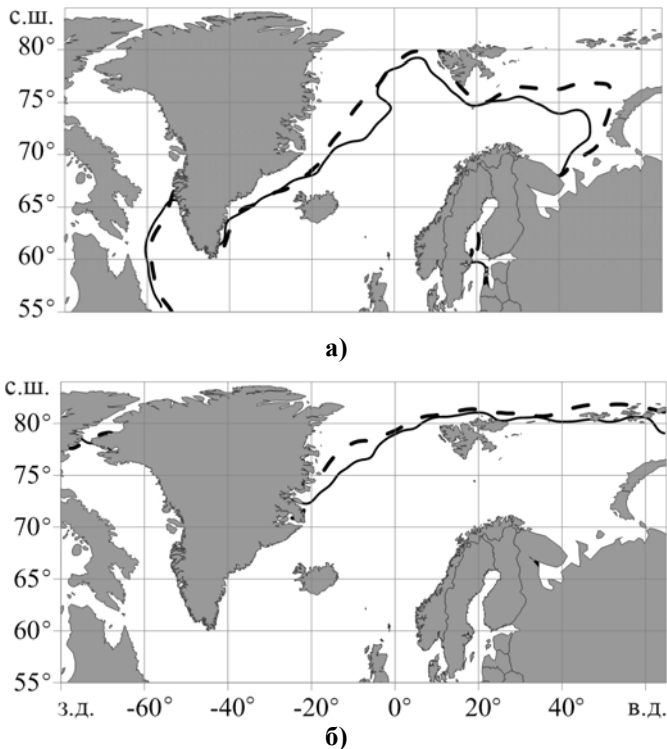
34,8 %, и вклад вариаций объема вод вследствие таяния льдов и вариаций речного стока. По мнению [18], циклоническая циркуляция в атмосфере над Арктическим бассейном способствует оттоку пресных вод, поступивших с евразийским речным стоком, в круговорот моря Бофорта под влиянием Арктической осцилляции и тем самым способствует аккумуляции пресных вод. Согласно выводам [21], с 1997 г. в Арктике наблюдается антициклонический режим, который привел к росту запаса пресных вод в Канадском бассейне. При циклоническом режиме антициклоническая циркуляция в круговороте Бофорта ослабевает, и пресные воды смещаются к шельфу, откуда могут быть легче вынесены в Северную Атлантику.

Средние зимние скорости ветра в Арктическом регионе увеличились в 2000–2015 гг., меридиональный перенос с севера на юг и западный перенос ослабли по сравнению с 1950–1960 гг. (рис. 3). Ослабление западного переноса согласуется с выводом о преобладании антициклонов в регионе, вследствие которого большая часть распределенных вод аккумулируется в круговороте Бофорта за счет усиленных ветров.



**Рис. 3.** Аномалии скорости ветра (слева) и зональной составляющей скорости ветра (справа) за декабрь-февраль 1950–1969 гг. (а), 2000–2015 (б), норма 1981–2010 гг.

Расположение кромки морского льда в Северной Атлантике за период 2000–2015 гг. (в данной работе для построения карт взято значение сплоченности льда 3 балла) согласуется с расположением кромки за период 1976–1981 гг. (рис. 4), когда наблюдалось максимальное распреснение в Северной Атлантике как в сентябре, так и в марте.

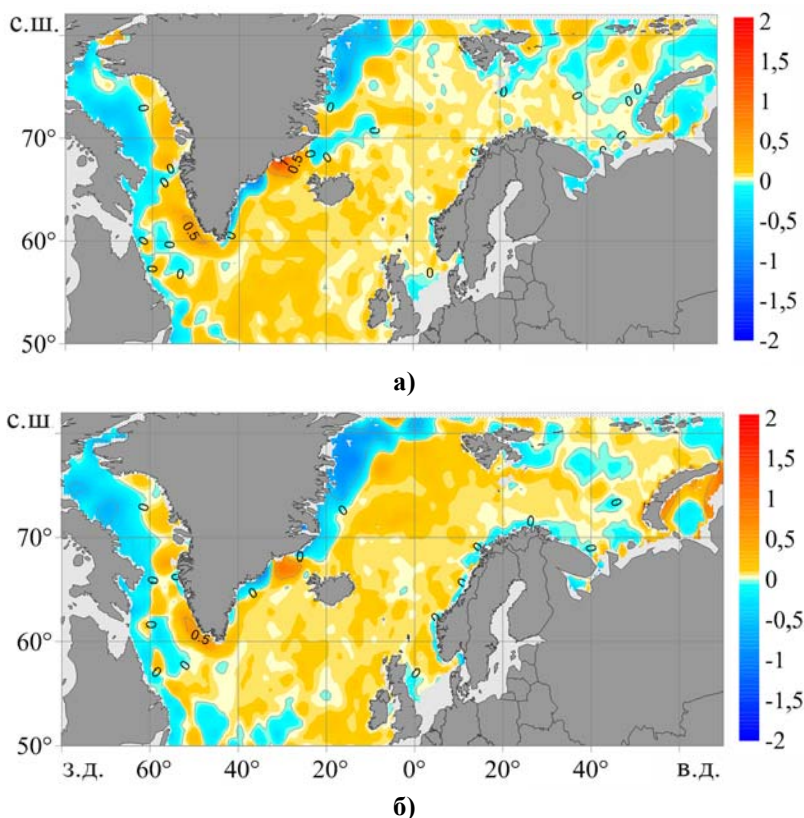


**Рис. 4.** Сплоченность морского льда за период 2000–2015 гг. (пунктирная линия), 1976–1981 гг. (сплошная линия): в марте (а), сентябре (б).

Среднегодовой вынос распресненных вод в субполярную Атлантику увеличился в последние две декады. 70 % выноса в настоящее время наблюдается в Лабрадорском море [22]. Вынос

морского льда через пролив Фрама также увеличился, однако распреснения на всей акватории Северной Атлантики, как в 1970-х гг., не наблюдается.

На рис. 5 представлено распределение аномалий средней солености в верхнем слое Северной Атлантики в 1950–1969 и 2001–2013 гг. относительно 1970-х гг., показывающее 60-летний цикл эволюции от положительной аномалии в 1950-е гг. через отрицательные аномалии 1970–1980-х гг. к положительной аномалии 2001–2013 гг.



**Рис. 5.** Аномалии солености в верхнем слое в 1950–1960-е гг. (а) и 2000–2013 гг. (б) в сравнении с 1970-ми гг.



В 1950-е и 2001–2013 гг. на акватории Северной Атлантики отмечена повышенная соленость в результате увеличенного притока атлантических вод из низких широт. В 1970–1980-е гг. для всего бассейна Северной Атлантики характерен отрицательный соленостный фон вследствие выноса распресненных вод из Арктики. Можно ожидать, что за максимумом солености 2001–2013 гг. последует новая отрицательная аномалия, подобная ВСА 1970–1980-х годов.

### **Выводы**

За последние десятилетия произошло перераспределение запаса пресных вод в Арктическом бассейне. Объем пресной воды увеличился в районах Канадского бассейна, прилегающих к Канадскому Арктическому архипелагу, и уменьшилось в центральном секторе Арктики и вдоль берегов Евразии.

Вынос морских льдов через пролив Фрама за последние два десятилетия увеличился, расположение кромки льда в Северной Атлантике за период 2000–2015 гг. соответствует расположению кромки льда в период 1976–1981 гг., когда наблюдалась «Великая соленостная аномалия».

Согласованность в формировании аномалий солености океана в 1960-х и 2000-х гг. в проливе Фрама и в море Баффина можно рассматривать в качестве предвестника возможной новой интенсивной соленостной аномалии в Северной Атлантике, индикатором которого может считаться возрастание выноса пресных вод и морского льда через пролив Фрама. В то же время с 2000 г. по настоящее время сохраняются тенденции роста температуры воздуха и повышения солености поверхностного слоя в рассматриваемом районе Северной Атлантики за счет увеличения притока из низких широт. Ослабление меридионального переноса и продолжающаяся аккумуляция пресных вод в Канадском бассейне Арктики также пока препятствует развитию значительной соленостной аномалии на акватории Северной Атлантики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-37-00053) в Гидрометцентре России (и МФТИ).

## Список использованных источников

1. *Алексеев Г.В.* и др. Изменения климата в морской Арктике в начале XXI века // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2010. – № 3 (86). – С. 22–34.
2. *Смирнов А.В.* Эволюция верхнего слоя океана в Северо-Европейском бассейне: Дис. ... канд. геогр. наук. – СПб.: ААНИИ, 2011.
3. *Тимохов Л.А.* и др. Климатические изменения содержания пресных вод в Северном Ледовитом океане и их причины // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2015. – № 106 (4). – С. 63–75.
4. *Тимохов Л.А.* и др. Изменения термохалинных характеристик трансполярной системы Северного Ледовитого океана // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2016. – № 108 (2). – С. 34–49.
5. *Belkin I.M. et al.* Great Salinity Anomalies» in the North Atlantic // Prog. Oceanogr. – 1998. – Vol. 41. – С. 1–68.
6. *Belkin I.M.* Propagation of the «Great Salinity Anomaly» of the 1990s around the northern North Atlantic // Geoph. Res. Let. – 2004. – Vol. 31. – L08306. – P. 1–4.
7. *Comiso J.C.* Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover // J. Clim. – 2012. – Vol. 25, No. 4. – P. 1176–1193.
8. *Dickson R.R. et al.* The «Great Salinity Anomaly» in the northern North Atlantic 1968–1982 // Prog. Oceanogr. – 1988. – Vol. 20. – С. 103–151.
9. *Dickson R.R. et al.* The Arctic Ocean response to the North Atlantic Oscillation // J. Clim. 2000. – Vol. 13, No. 15. – P. 2671–2696.
10. ESRL Physical Sciences Division. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/> (дата обращения: 05.05.2016).
11. *Haak H. et al.* Formation and propagation of great salinity anomalies // Geoph. Res. Let. – 2003. – Vol. 30, No. 9. – P. 1–4.
12. *Hakkinen S., Proshutinsky A.* Freshwater content variability in the Arctic Ocean // J. Geoph. Res. – 2004. – Vol. 109. – C03051. – doi:10.1029/2003JC001940.
13. *Halvorsen M.H. et al.* Fram Strait spring ice export and September Arctic sea ice // The Cryosphere Discuss. – 2015. – Vol. 9. – P. 4205–4235.
14. *Kalnay E. et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 1996. – Vol. 77. – P. 437–471.
15. *Koenigk T. et al.* Arctic freshwater export in the 20th and 21st centuries // J. Geoph. Res. – 2007. – Vol. 112. – G04S41. – doi:10.1029/2006JG000274CrossRef.
16. *Korablev A.A., Smirnov A. V., Baranova O.K.* Climatological atlas of the Nordic Seas and Northern North Atlantic. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/nordic-seas/> (дата обращения: 14.06.2014).

17. *Kwok R., Rothrock D.A.* Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008 // *Geoph. Res. Let.* – 2009. – Vol. 36. – L15501. – doi:10.1029/2009GL039035.
18. *Morison J. et al.* Changing Arctic Ocean freshwater pathways // *Nature.* – 2012. – Vol. 481, No. 7379. – P. 66–70.
19. *Mysak L.A., Venegas S.A.* Decadal climate oscillations in the Arctic: A new feedback loop for atmosphere-ice-ocean interactions // *Geoph. Res. Let.* – Vol. 25, No. 19. – P. 3607.
20. National snow and data center (NSIDC)/ – [Электронный ресурс]. URL: <http://nsidc.org/> (дата обращения: 01.06.2016).
21. *Proshutinsky A. et al.* Beaufort Gyre freshwater reservoir: State and variability from observations // *J. Geoph. Res.* – 2009. – Vol. 114. – C00A10.
22. *Rayner N.A. et al.* Global analysis of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geoph. Res.* – 2003. – Vol. 108, No. D14. – P. 4407. – doi: 10.1029/2002JD002670.
23. *Smedsrud L.H. et al.* Recent wind driven high sea ice area export in the Fram Strait contributes to Arctic sea ice decline // *Cryosphere Discuss.* – 2011. – Vol. 5. – P. 821–829.
24. *Spreen G. et al.* Fram Strait Sea Ice Volume Export 1992–2012 from Combined ULS and Satellite Data. – American Geophysical Union, Fall Meeting, 2013. – URL: <http://brage.bibsysno/xmlui/bitstream/handle/11250/194641/1/C3%A5rsmelding2013.pdf>
25. *Stroeve J.C et al.* The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: A research synthesis // *Climatic Change.* – 2012. – Vol. 110, No. 3–4. – P. 1005–1027.
26. *Yang Q. et al.* Recent increases in Arctic freshwater flux affects Labrador Sea convection and Atlantic overturning circulation // *Nature Communications.* – 2016. – Vol. 7. – 10525. – P. 1–7.
27. *Zhang R., Vallis G.K.* Impact of Great Salinity Anomalies on the Low-Frequency Variability of the North Atlantic Climate // *J. Climate.* – 2006. – Vol. 19. – P. 470–482.

*Поступила в редакцию 23.06.2016 г.*