

УДК 551.465

## СВЯЗЬ ТЕРМОХАЛИННЫХ АНОМАЛИЙ ГЛУБИННЫХ ВОД ОКЕАНА С АНОМАЛИЯМИ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

© 2009 г. А. А. Сарафанов

Представлено академиком Р.И. Нигматулиным 11.12.2008 г.

Поступило 11.12.2008 г.

Северная периферия Атлантики – район активного взаимодействия океана и атмосферы. Промежуточные и глубинные водные массы, формирующиеся в регионе – Лабрадорская промежуточная (ЛВ), Северо-Восточная глубинная (СВГВ) и Северо-Западная глубинная (СЗГВ) – распространяются на юг, образуя холодное нижнее звено термохалинной циркуляции вод Мирового океана [1]. ЛВ формируется в результате глубокой зимней конвекции в море Лабрадор [2] и, эпизодически, в море Ирмингера [3]. Глубинные водные массы – продукт смешения арктических вод, поступающих в Атлантику над хребтом между Гренландией и Великобританией, с более теплыми и солеными атлантическими водами и ЛВ [4].

Термохалинные характеристики ЛВ и глубинных вод претерпевают значительные изменения в масштабе десятилетий, наследуя сигналы многолетних изменений климатических и гидрологических условий в регионе [2–7]. Охлаждение и распреснение этих водных масс, длившееся со второй половины 1960-х по середину 1990-х годов [4], привело к распреснению толщи вод субарктической Атлантики в среднем на  $\sim 0.03$  епс [5]. Изменения характеристик глубинных вод, зарождающиеся в субполярном регионе, были зафиксированы и в низких широтах [8].

В ряде исследований распреснение глубинных вод в 1960–1990-х годах рассматривалось как возможный результат глобального изменения климата [5, 9]. Согласно этой гипотезе, глобальное потепление приводит к интенсификации гидрологического цикла планеты – к увеличению испарения с поверхности океана в тропиках и выпадения осадков в высоких широтах, что вызывает распреснение вод Арктики и, как следствие, распреснение глубинных вод Атлантики. Численные модели, исходящие из продолжения глобального по-

тепления под влиянием антропогенного фактора, предсказывают продолжение распреснения глубинных вод в начале XXI века [9].

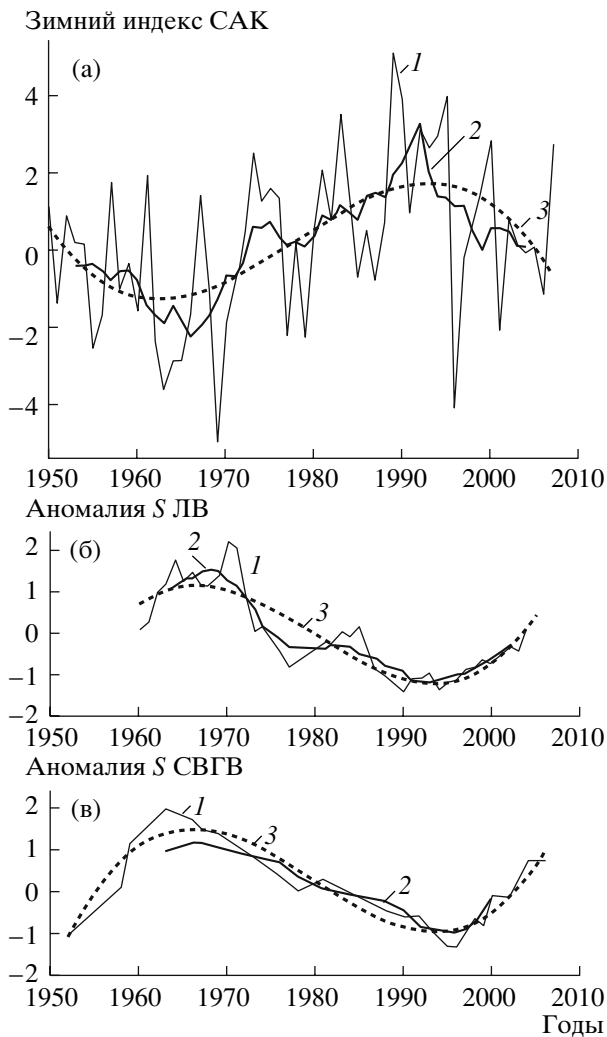
Мониторинг вод субарктической Атлантики на разрезе по  $60^\circ$  с.ш. позволил зафиксировать смену тенденции распреснения промежуточных и глубинных вод в середине 1990-х годов [6, 7, 10], что опровергло гипотезу о глобальных причинах предшествующего опреснения глубинных вод, так как однонаправленное изменение климата, чем бы оно ни было вызвано, не может приводить к разнонаправленным тенденциям изменений характеристик вод океана [7].

Несостоятельность гипотезы о глобальных причинах глубоководных изменений в субарктической Атлантике приводит к необходимости поиска региональных факторов, формирующих аномалии характеристик глубинных вод в масштабе десятилетий.

Главный фактор, определяющий естественные климатические изменения в субарктической Атлантике на временных отрезках от года до десятилетий, – североатлантическое колебание (САК), количественно выражаемое в виде индекса САК – нормированной разницы атмосферного давления на поверхности океана между Азорскими островами и Исландией [11]. Аномалиям разницы атмосферного давления соответствуют аномалии интенсивности северо-западного атмосферного переноса, ответственные за изменения интенсивности зимнего охлаждения поверхностных вод и, как следствие, за изменения интенсивности конвекции, а также за изменения гидрологических условий в районах формирования водных масс, связанные с аномалиями тепло- и влагообмена с атмосферой и региональной циркуляцией вод [3, 4, 10–14].

На рис. 1 приведены временные ряды зимнего индекса САК и аномалий солености промежуточных (ЛВ) и глубинных (СВГВ) вод в районах их формирования – в море Лабрадор и Исландском бассейне соответственно. На рисунке видно, что, помимо значительной межгодовой изменчивости,

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова  
Российской Академии наук, Москва*



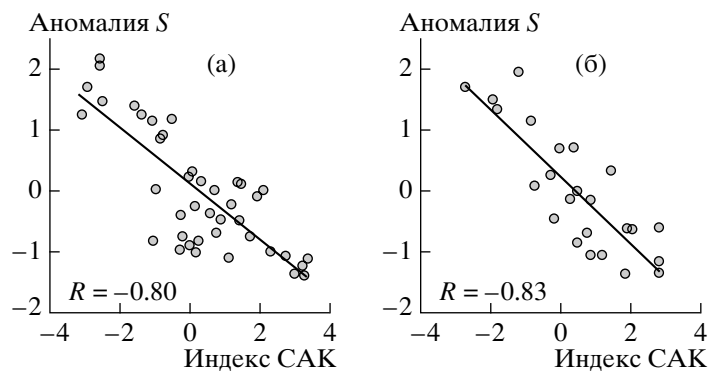
**Рис. 1.** Зимний индекс САК (а) и аномалии солёности (S) водных масс в районах их формирования: ЛВ в море Лабрадор (б) и СВГВ в Исландском бассейне (в). Аномалии солёности нормированы на их стандартные отклонения; 1 – временные ряды, 2 – долгосрочные изменения показаны с помощью семилетнего скользящего осреднения, 3 – кубические полиномы.

САК имеет выраженную низкочастотную составляющую и временные отрезки направленных изменений солёности ЛВ и СВГВ совпадают с тремя эпизодами направленного изменения индекса (1950-е–середина 1960-х годов, середина 1960-х – середина 1990-х и середина 1990-х–середина 2000-х годов).

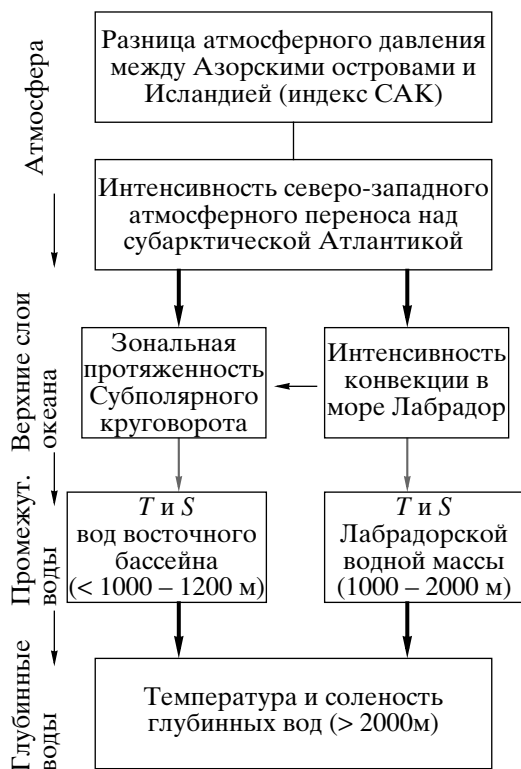
Коэффициенты корреляции аномалий солёности ЛВ и СВГВ с индексом САК составляют соответственно  $-0.80$  и  $-0.83$  при осреднении индекса САК за 3 зимы (для ЛВ) и 5 зим (для СВГВ), предшествующих измерениям солёности (рис. 2), что означает быстрый – в рассматриваемом временном масштабе – “отклик” изменений солёности ЛВ и глубинных вод на изменения тенденции САК. Приведённая оценка справедлива и для связи аномалий температуры ЛВ и СВГВ с индексом САК вследствие тесной связи аномалий температуры этих водных масс с аномалиями их солёности (см. [6]).

Общий механизм, объясняющий передачу сигнала САК в глубинные слои океана, представлен на рис. 3 в виде схемы, отражающей связь многолетнего роста (уменьшения) температуры и солёности глубинных вод с многолетним уменьшением (ростом) индекса САК. Схема основана на новейших результатах мониторинга вод субполярной Северной Атлантики [3, 6, 7, 10, 13–15], многие из которых [3, 6, 7, 10] получены специалистами Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Многолетнему уменьшению индекса САК соответствует ослабление северо-западного переноса над субарктической Атлантикой. Вследствие ослабления северо-западного переноса уменьшается теплоотдача с поверхности океана в зимний период. Это приводит к ослаблению конвекции в море Лабрадор. Ослабление ветрового воздействия на поверхность океана вместе с ослаблением конвекции приводят к уменьшению интенсивности циклонической циркуляции Субполярного круговорота и его зональной протяжённости [10, 14]. Вследствие сжатия Субполяр-



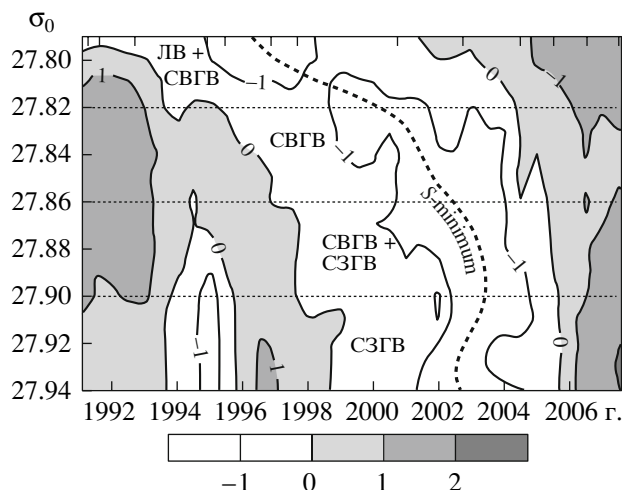
**Рис. 2.** Корреляции аномалий солёности ЛВ (а) и СВГВ (б), показанных на рис. 1, с зимним индексом САК, осредненным соответственно за 3 и 5 лет, предшествующих измерениям солёности. Обе корреляции значимы на уровне 99.9%.



**Рис. 3.** Общий механизм передачи сигнала САК в глубинные слои океана, объясняющий долгопериодные изменения температуры ( $T$ ) и солёности ( $S$ ) глубинных вод. Положительная (отрицательная) связь (жирные и светлые стрелки соответственно) означает, что изменения совпадают (противоположны) по знаку. В целом связь (корреляция) аномалий характеристик глубинных вод с индексом САК отрицательная (см. рис. 2).

ного круговорота происходит увеличение вклада теплых солёных субтропических вод в структуру вод восточного бассейна на глубинах до ~1200 м [10, 13, 14] и в приток атлантических вод в Норвежское и Гренландское моря [13, 15], где формируются аномалии характеристик конвективных вод, образующих атлантические глубинные воды. Положительные аномалии температуры и солёности подповерхностных и промежуточных вод в восточном бассейне передаются глубинным водам вследствие вовлечения атлантических вод в слой СВГВ по мере формирования этой водной массы к югу от хребта между Исландией и Великобританией [4]. В результате повышается температура и солёность глубинных вод [6, 7].

Ослабление конвекции в море Лабрадор приводит к ослаблению конвективного обновления холодной и распреснённой ЛВ [2, 14] и, как следствие, к положительным аномалиям температуры и солёности на промежуточных глубинах в слое ЛВ (~1000–2000 м) [3, 6, 7]. ЛВ вовлекается в слой СВГВ в Исландском бассейне, в разломе Чарли-Гиббс и в море Ирмингера [4]; таким обра-



**Рис. 4.** Аномалии солёности на изопикнических поверхностях ( $\sigma_0$ ) в центральной части моря Ирмингера в 1991–2007 гг.; аномалии на каждой изопикне нормированы на их стандартное отклонение. Плотностные интервалы водных масс и их смесей (ЛВ + СВГВ, СВГВ + СЗГВ) даны пунктиром; моменты измерений отмечены на верхней оси; S-minimum – линия, отмечающая время наименьших значений солёности.

зом положительные аномалии характеристик ЛВ передаются глубинным водам, что усиливает их потепление и осолонение.

Передача сигнала термохалинных изменений из слоя ЛВ в слой СВГВ проиллюстрирована рис. 4, на котором показано распределение аномалий солёности в море Ирмингера в 1991–2007 гг. на поверхностях равной потенциальной плотности, приведенной к давлению 0 дбар ( $\sigma_0$ ) в толще вод начиная с нижней части слоя ЛВ ( $\sigma_0 = 27.79$ ) до дна. На рисунке видно устойчивое осолонение СВГВ с начала 2000-х годов – следствие осолонения СВГВ в Исландском бассейне с 1996–1997 гг. и пятилетнего распространения этой водной массы из Исландского бассейна в море Ирмингера [6]. О передаче сигнала осолонения ЛВ (начавшегося в море Ирмингера в 1996–1997 гг.) в слой СВГВ свидетельствует факт начала осолонения в верхней части слоя СВГВ ( $27.82 > \sigma_0 > 27.84$ ) на 1–2 года раньше, чем в нижней части слоя ( $27.85 > \sigma_0 > 27.86$ ), где рост солёности наблюдался с 2002 г. (рис. 4).

В периоды роста индекса САК изменения противоположны изложенным выше. С середины 1960-х по середину 1990-х годов происходило усиление конвекции в море Лабрадор, приводившее к охлаждению и распреснению ЛВ (рис. 1) [4], распреснение подповерхностных и промежуточных вод в Исландском бассейне [4], распреснение потока вод из Атлантики в Норвежское море [15] и, как следствие, распреснение глубинных вод, формирующихся в субарктической Атлантике (рис. 1) [4, 5].

Можем выделить два главных фактора, обуславливающих тесную связь термохалинных аномалий глубинных вод с Североатлантическим колебанием: 1) зональная протяженность Субполярного круговорота, регулирующая вклад холодных распресненных субарктических и теплых соленых субтропических вод в формирование глубинных вод; 2) интенсивность конвекции в море Лабрадор, ответственной за проникновение холодных и распресненных субарктических поверхностных вод в промежуточные и глубинные слои океана.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых кандидатов наук МК-1998.2008.5 и гранта РФФИ 08-05-00858.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lanno C.C.* В кн.: Исследование процессов взаимодействия океана и атмосферы. М.: Гидрометеоздат, 1984. С. 125–129.
2. *Lazier J.R.N., Hendry R., Clarke A. et al.* // *Deep Sea Res. I.* 2002. V. 49. P. 1819–1835.
3. *Falina A., Sarafanov A., Sokov A.* // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. C01006. doi: 10.1029 / 2005JC003348.
4. *Dickson R.R., Yashayaev I., Meincke J. et al.* // *Nature.* 2002. V. 416. P. 832–837.
5. *Curry R., Dickson R., Yashayaev I.* // *Nature.* 2003. V. 426. P. 826–829.
6. *Sarafanov A., Sokov A., Demidov A., Falina A.* // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L23609. doi:10.1029 / 2007GL031074.
7. *Сарафанов А.А., Соков А.В., Фалина А.С.* // *Океанология.* 2009. № 1. Т. 49. С. 1–13.
8. *Sarafanov A., Sokov A., Demidov A.* // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. C12023. doi:10.1029 / 2007JC004222.
9. *Wu P., Wood R., Stott P.* // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L02301. doi:10.1029 / 2003GL018584.
10. *Sarafanov A., Falina A., Sokov A., Demidov A.* // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. doi:10.1029 / 2008JC004975.
11. *Hurrell J.W.* // *Science.* 1995. V. 269. P. 676–679.
12. *Visbeck M., Chassignet E., Curry R. et al.* *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and environmental Impact.* *Geophys. Monogr. Ser.* Washington: AGU, 2003. V. 134. P. 113–145.
13. *Hátún H., Sandø A.B., Drange H.* // *Science.* 2005. V. 309. P. 1841–1844.
14. *Bersch M., Yashayaev I., Koltermann K.P.* // *Ocean Dyn.* 2007. V. 57. P. 223–235.
15. *Holliday N.P., Hughes S.L., Bacon S. et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L03614. doi:10.1029/2007GL032675.