

## Низкочастотная изменчивость характеристик пикноклина в Северной Атлантике и ее связь с Североатлантическим колебанием

На основе обработки океанографических данных для акватории Северной Атлантики за 1950 – 1999 гг. (~ 500 000 станций) исследованы сезонные и межгодовые вариации основных характеристик пикноклина в диапазоне  $\sigma_t = 25,5 - 27,5$  единиц условной плотности. Показано, что их межгодовые колебания во всем исследованном слое представляют собой суперпозицию флуктуаций с периодами от 2 – 3 до 10 – 12 лет. Типичный размах этих флуктуаций для глубин залегания изопикнических поверхностей, температуры и солености на них составляет соответственно 20 – 25 м, 1 – 1,5°C и 0,25‰. Интенсификация атмосферной циркуляции в средних широтах сопровождается синхронным заглублением пикноклина и его нагреванием в центральной части Северного Субтропического антициклонического круговорота, а ослабление атмосферной циркуляции – поднятием пикноклина и его охлаждением. Полный цикл взаимодействия Североатлантического колебания с аномалиями изопикнических характеристик с учетом времени их адвекции составляет ~ 6 – 8 лет.

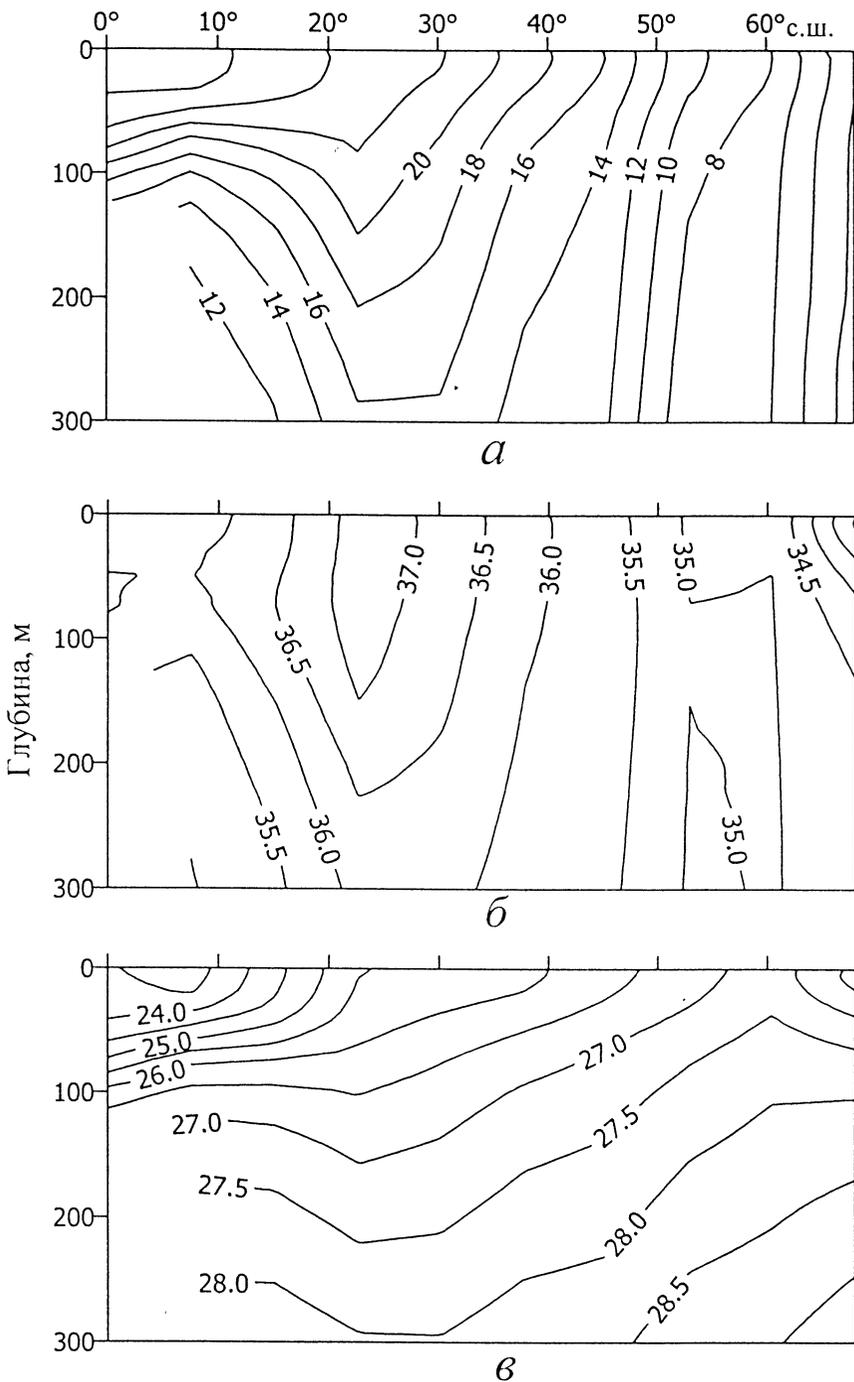
### Введение

В последние десятилетия получены весомые аргументы, указывающие на наличие взаимосвязанных колебаний в североатлантической системе океан – атмосфера межгодового – десятилетнего масштаба (см., например, [1]). Показано, в частности, что полный цикл взаимодействия Североатлантического колебания (САК) с аномалиями температуры деятельного слоя океана с учетом времени их адвекции составляет ~ 6 – 8 лет [2]. Признается, что для поддержания САК важно и взаимодействие между океаническими круговоротами, включая адвекцию термических аномалий крупномасштабными течениями. Отмеченные процессы в системе океан – атмосфера проявляются, в частности, в изменениях поля теплозапаса деятельного слоя океана. Полученные результаты подтверждают идею Бьеркнеса о принципиальной важности адвекции тепла в океане для формирования низкочастотной изменчивости системы океан – атмосфера в Северной Атлантике [3]. Вопрос о том, насколько обратимыми являются изменения теплозапаса деятельного слоя океана, остается открытым. Значительную роль в низкочастотной изменчивости теплозапаса могут играть упорядоченные вертикальные движения в термоклине, меняющиеся квазипериодическим образом (например, из-за изменения завихренности поля ветра Субтропической Атлантики) и представляющие собой обратимые изменения. Не исключено и даже более вероятно, что значительная доля изменчивости теплозапаса обусловлена адвекцией термических

аномалий, которые, формируясь, например, в зонах аномально интенсивной конвекции и/или субдукции, распространяются далее вдоль изопикнических поверхностей, поднимаются к поверхности в зонах дивергенции и перемещаются в верхнем квазиоднородном слое (ВКС). На это указывают результаты многих работ (см., например, [4 – 6]).

Ясно, что относительная роль изопикнических и неизопикнических изменений в поле температуры зависит от физико-географических условий. Так, в [4, 5] показано, что в Атлантическом океане теплообмен между средними широтами и тропической зоной в значительной степени осуществляется в пределах так называемых субтропических ячеек. В частности, в Северной Атлантике поверхностные воды средних широт вовлекаются в процесс субдукции и переносятся вдоль изопикнических поверхностей в тропические и приэкваториальные широты. Здесь значительная часть этих вод, поднимаясь к поверхности, перемещивается в ВКС и возвращается поверхностными течениями в средние широты, где и замыкает субтропическую ячейку Северного полушария. Вертикальная неизопикническая адвекция наиболее важна, по-видимому, в области внутритропической зоны конвергенции. Что касается роли глубинных вод в меридиональном теплообмене, то она становится принципиальной, если рассматривать глобальную циркуляционную ячейку Стоummела [6, 7].

Вполне естественно полагать, что пространственно-временная изменчивость характеристик изопикнических поверхностей, выходящих в приповерхностные слои океана в зонах наиболее интенсивного энергообмена с атмосферой, где они получают основную долю энергонесущего импульса, является откликом на атмосферное воздействие. Вместе с тем сформировавшиеся в океане термические аномалии, распространяясь в поле крупномасштабных течений вдоль изопикнических поверхностей, через некоторое время должны достигнуть ВКС в зоне активного взаимодействия океана с атмосферой и возбудить аномалии в атмосферных полях. В связи с этим представляется актуальным исследование низкочастотных (сезонных и межгодовых) флуктуаций основных характеристик изопикнических поверхностей (глубины залегания изопикны, температуры и солёности на изопикне), а также выявление возможных связей между этими колебаниями и изменчивостью атмосферной циркуляции. Это и является целью настоящей работы. В качестве объектов исследования выбраны изопикнические поверхности в диапазоне  $\sigma_t = 25,5 - 27,5$  единиц условной плотности (ед. усл. пл.), выклинивающиеся к поверхности океана между 25 и 60° с.ш., где наблюдается халинная и термическая конвекция (рис. 1). Низкочастотные вариации ветрового воздействия на деятельный слой океана в средних широтах (приблизительно между 45 и 60° с.ш.) наиболее эффективно реализуются через изменения скорости субдукции в диапазоне  $\sigma_t = 26,0 - 27,0$  ед. усл. пл. Поэтому анализу изменчивости изопикнических характеристик этого диапазона и будет уделено основное внимание.



**Р и с. 1.** Среднегодовое распределение температуры (а), солёности (б) и условной плотности (в) на меридиональном разрезе по 30° з.д., вычисленное для узлов 2-градусной сетки (узлы – суть центры сферических прямоугольников со сторонами 2° широты × 2° долготы, весовой коэффициент равен 1)

## Использованный материал и методика его обработки

В работе использованы массивы электронного банка океанографических данных, сформированного в 2001 г. в Институте полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера в Бремергагене [8]. По первичным данным, взятым из [8], для района Северной Атлантики, ограниченного экватором и 70°с.ш., в узлах двухградусной сетки сформированы массивы среднегоголетних (годовых и месячных), текущих среднегодовых и среднемесячных профилей температуры, солености и плотности. Плотность вычислялась по формуле ЮНЕСКО [9]. Затем для каждого узла сетки по данным соответствующих вертикальных профилей плотности были определены характеристики изопикнических поверхностей  $\bar{X}$  и  $\bar{X}_{мес}$  – среднегоголетнее и среднемноголетнее месячное значения, а также сформированы ряды текущих среднегодовых  $\{\bar{X}_{год}\}$  и среднемесячных  $\{\bar{X}_{год, мес}\}$  значений. Здесь  $X$  означает глубину залегания изопикны ( $h_{\sigma_t}$ ), температуру ( $t_{h, \sigma_t}$ ), и соленость ( $S_{h, \sigma_t}$ ) на изопикне. Узлы сетки рассматривались как центры сферических прямоугольников (СП), стороны которых составляют 1° широты и 1° долготы (на экваторе). Данные, попадавшие в пределы СП, осреднялись с равными весовыми коэффициентами, то есть производилось среднеарифметическое осреднение.

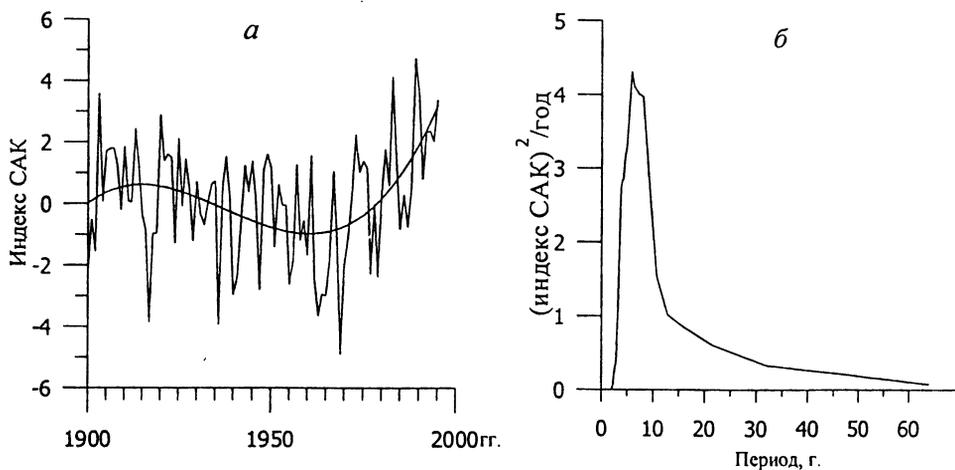
Текущие среднегодовые и среднемноголетние месячные значения вычислялись по формулам  $\bar{X}_{год} = \sum \bar{X}_{год, мес}$  и  $\bar{X}_{мес} = \sum \bar{X}_{год, мес}$  с учетом соответствующего индекса, то есть в первом случае учитывался первый индекс и игнорировался второй, а во втором случае игнорировался первый индекс и учитывался второй. Минимальная обеспеченность каждого текущего среднегодового значения  $\bar{X}_{год}$  составляет 4 значения  $\bar{X}_{год, мес}$ .

По данным совокупностей  $\{\bar{X}_{год, мес}\}$ ,  $\{\bar{X}_{мес}\}$  и  $\{\bar{X}_{год}\}$  вычислялись соответственно общая дисперсия изопикнических характеристик  $\sigma^2$ , а также дисперсии сезонных и межгодовых флуктуаций ( $\sigma^2_{сез}$  и  $\sigma^2_{межгод}$ ). Причем анализировались дисперсии, рассчитанные не менее чем по 15 значениям  $\bar{X}_{год, мес}$  для  $\sigma^2$ , по 9 значениям  $\bar{X}_{мес}$  для  $\sigma^2_{сез}$  и по 4 значениям  $\bar{X}_{год}$  для  $\sigma^2_{межгод}$ . В использованном массиве первичных океанографических данных на акваторию Северной Атлантики, рассматриваемую в данной работе, приходится ~ 500 000 станций, которые содержат данные, полученные до 1999 г. включительно. Тем не менее обеспеченность полученных рабочих массивов  $\bar{X}_{мес}$ ,  $\bar{X}_{год}$ ,  $\bar{X}_{год, мес}$ , к сожалению, невысока. Так, обеспеченность текущих среднемесячных значений  $\bar{X}_{год, мес}$  редко превышает десяток измерений, а в подавляющем большинстве узлов она составляет 1 – 2 измерения. Поэтому для выделения флуктуаций на межгодовом масштабе произведено большее пространственное осреднение: меридиональные и зональные размеры СП увеличивались и составляли 2° по широте и 5° по долготе соответственно. Увеличивался при этом и шаг сетки в зональном направлении, он составлял 5° долготы. Учитывая большую пространственно-временную неоднородность исходных данных, было решено не применять более сложных процедур

осреднения. Поэтому осреднение в пределах СП, также как и ранее, производилось с весовым коэффициентом, равным единице.

С целью установления возможной связи между низкочастотными колебаниями изопикнических характеристик и изменчивостью атмосферной циркуляции вычислялись функции взаимной корреляции для рядов  $\{\bar{X}_{\text{год}}\}$ ,  $\{I_{\text{САК}}\}$ . Здесь  $I_{\text{САК}}$  – индексы САК, взятые из [10]. В данном случае они представляют собой разности приземного давления в области Исландского минимума (пункт Стиккисхоульмур, Исландия) и Азорского максимума (пункт Лиссабон, Португалия), нормированные на стандартное отклонение. Функции взаимной корреляции вычислялись в диапазоне сдвигов от  $-7$  до  $+7$  лет (отрицательный и положительный знаки означают соответственно опережение или запаздывание индексов САК относительно флуктуаций текущих среднегодовых характеристик исследуемой изопикнической поверхности). Поскольку основная доля имеющихся океанографических данных получена во второй половине XX в., то для вычисления функций взаимной корреляции использовались ряды  $\{\bar{X}_{\text{год}}\}$  с 1950 г. по 1999 г. и ряды индексов САК с 1943 г. по настоящее время. Если анализируемые ряды были обеспечены менее чем 25 парами среднегодовых величин (т.е. пропуски составляли более половины 50-летнего периода), вычисления не производились.

Ранее было показано, что спектр колебаний индексов САК характеризуется значимыми пиками на периодах 2 – 3 года и  $\sim 6 - 8$  лет [2]. В указанный отрезок времени в колебаниях индексов САК наблюдался выраженный положительный тренд (рис. 2). Положительный тренд наблюдается и в большинстве рядов  $\{\bar{X}_{\text{год}}\}$ , обеспеченных не менее чем 25 парами среднегодовых величин. Поэтому функции взаимной корреляции вычислялись для рядов, предварительно очищенных от трендов.



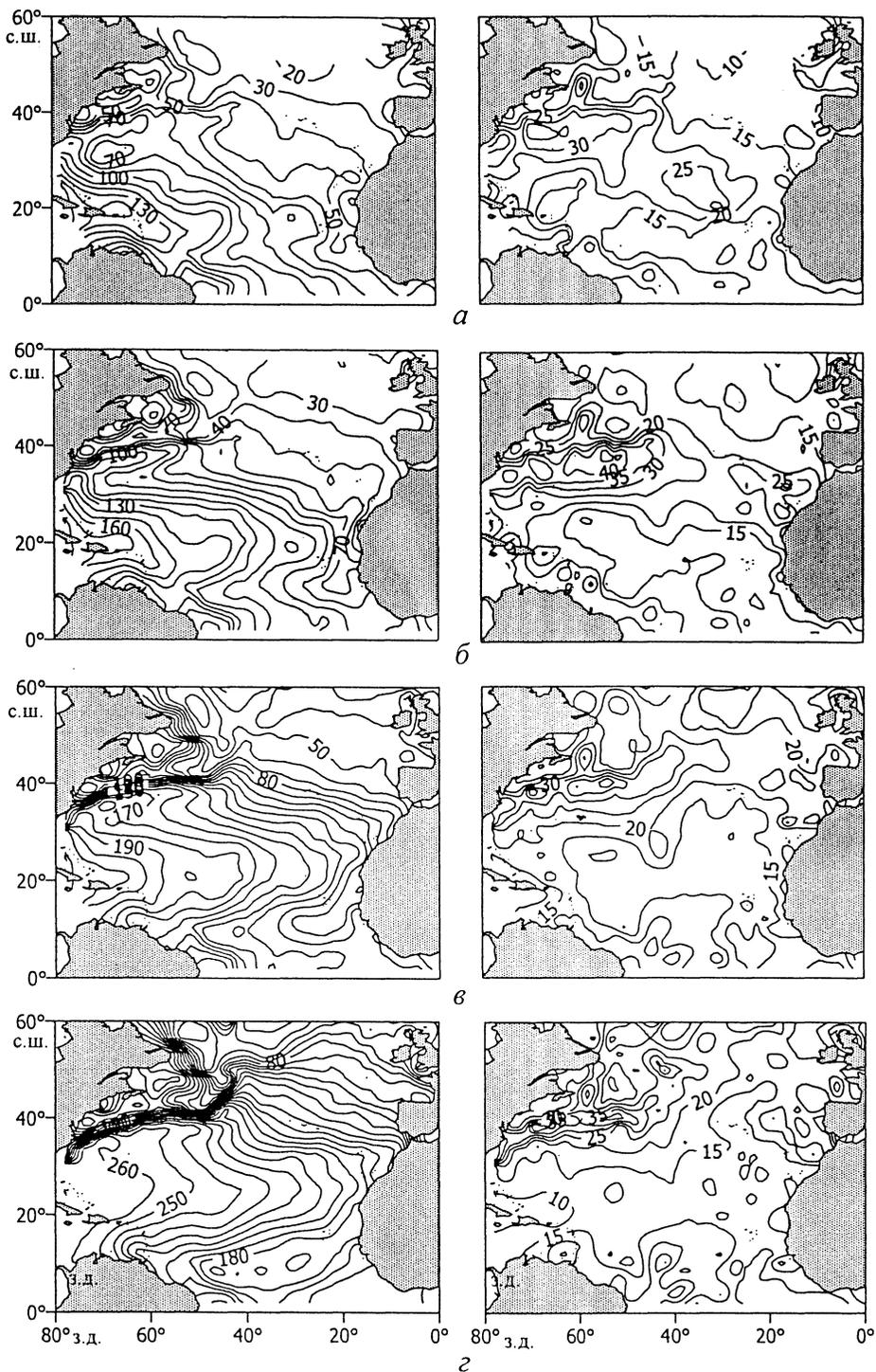
Р и с. 2. Текущие ежегодные значения индексов САК (а) и спектр их аномалий (б). Сглаженная кривая – аппроксимирующий полином 3-й степени

Климатические характеристики. Среднемноголетняя топография исследуемых изопикнических поверхностей (рис. 3) представляет собой чередующиеся области гребней и ложбин, оконтуривающих известные крупномасштабные динамические структуры: Северный Субтропический антициклонический круговорот (ССАК) и Северный Тропический циклонический круговорот (СТЦК). В частности, ССАК представлен обширной ложбинной областью, характеризующейся максимальными глубинами залегания изопикнических поверхностей. В верхних слоях пикноклина ( $\sigma_t < 27,5$  ед. усл. пл.), между 35 и 40° с.ш. и западнее 40 – 45° з.д., в пределы ССАК с востока вклинивается узкий гребень, указывающий на существование рециркуляционного звена Гольфстрима (впервые об этом звене циркуляции говорилось в работе [11]). СТЦК выделяется в виде гребня, ось которого простирается вдоль Западного побережья Африки в виде апвеллинговой зоны приблизительно по 20° з.д. и далее вдоль северной границы Межпассатного противотечения (~ 10° с.ш.) до побережья Южной Америки.

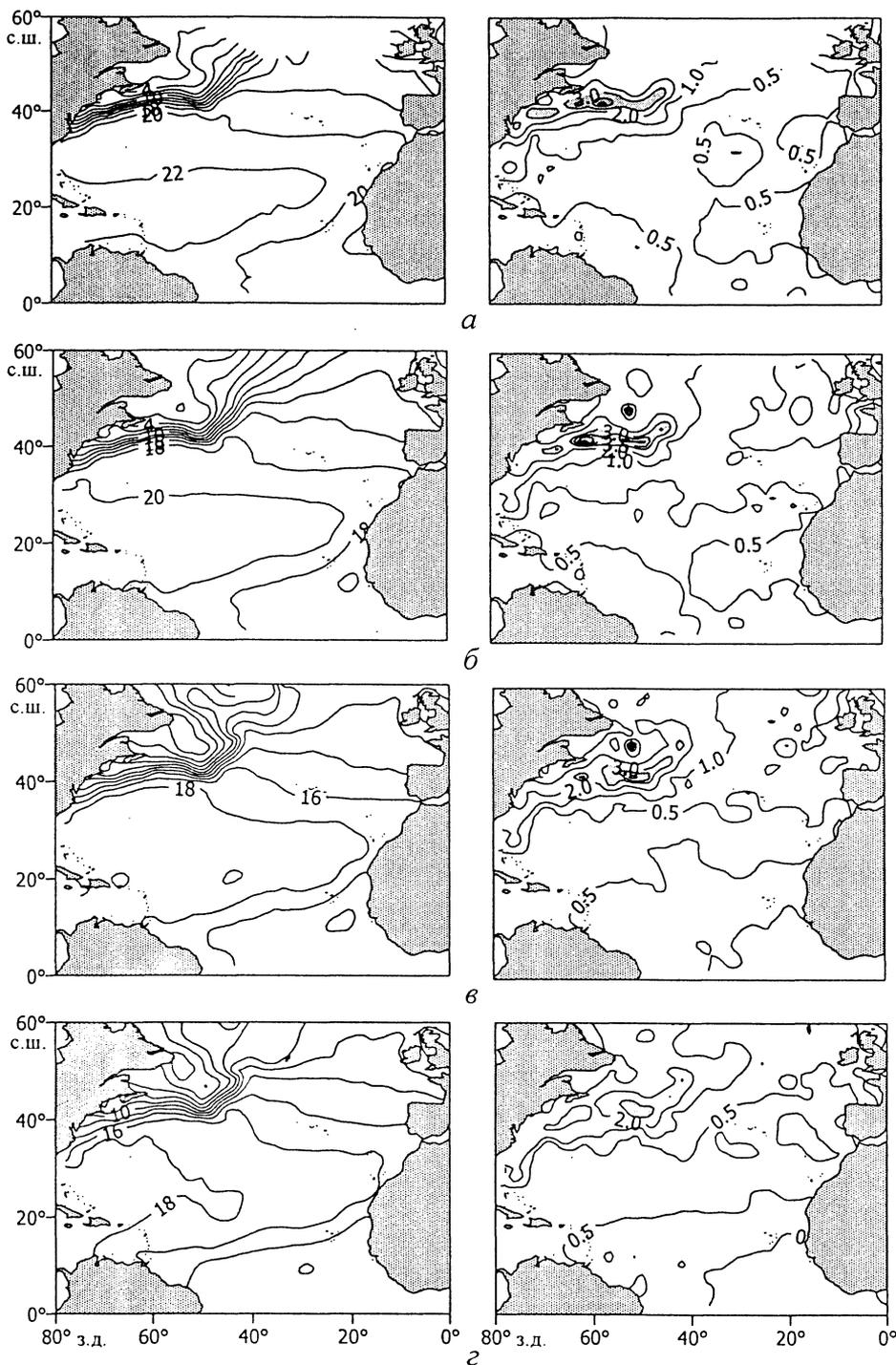
Таким образом, топография исследуемых изопикнических поверхностей хорошо очерчивает известные звенья крупномасштабной циркуляции, такие, в частности, как основная струя Гольфстрима, зона его рециркуляции, Северное Пассатное течение и Межпассатное противотечение. Также хорошо выделяется северо-западная периферия Северного Экваториального антициклонического круговорота, где происходит разворот Северного Бразильского течения, подробно описанный в литературе [12].

Среднемноголетняя глубина залегания изоповерхностей  $\sigma_t = 26,0 - 27,0$  ед. усл. пл. изменяется от значений, близких к нулевым в области их выхода на поверхность, до глубин соответственно 130 – 150 м, 190 – 200 м в западном секторе Тропической Атлантики. Максимальное заглубление изоповерхностей имеет место в бассейне Карибского моря.

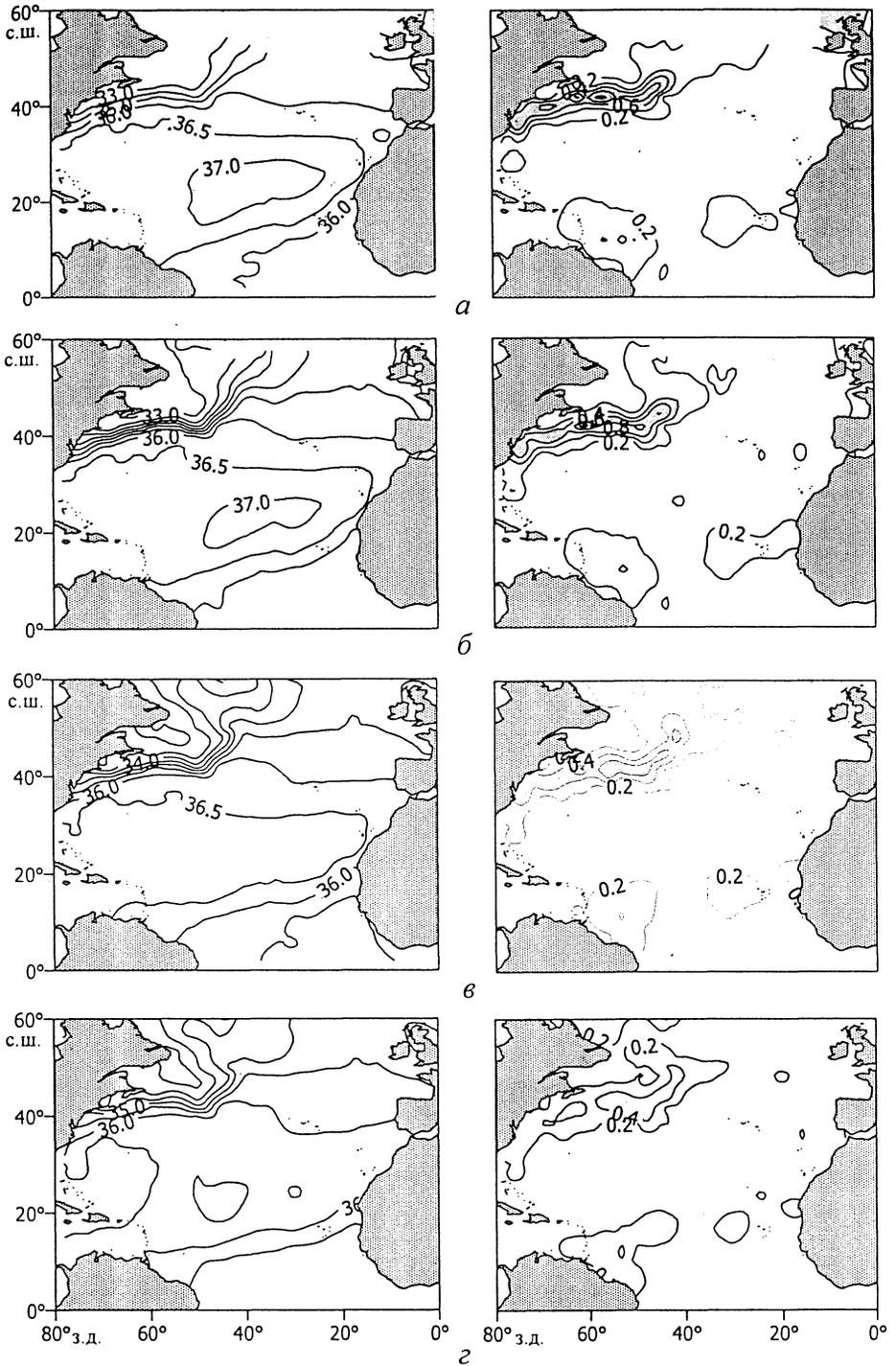
Минимальные значения температуры и солености (рис. 4, 5) на рассматриваемых изопикнах (составляющие соответственно ~ 0 – 1°C и 32,5 – 34,0 ‰) наблюдаются в лабдорских водах, а максимальные величины – в центральной части ССАК. Среднемноголетние значения температурных и соленостных максимумов изменяются от значений, превышающих 22°C и 37 ‰ на изопикне  $\sigma_t = 26,0$ , до 18°C и 36,5‰ – на изопикне  $\sigma_t = 27,5$ .



Р и с. 3. Среднеголетнее положение глубин залегания изопикнических поверхностей (слева) и их среднеквадратические отклонения (справа): *a* –  $\sigma_t = 26,0$  ед. усл. пл.; *б* –  $\sigma_t = 26,5$  ед. усл. пл.; *в* –  $\sigma_t = 27,0$  ед. усл. пл.; *г* –  $\sigma_t = 27,5$  ед. усл. пл.

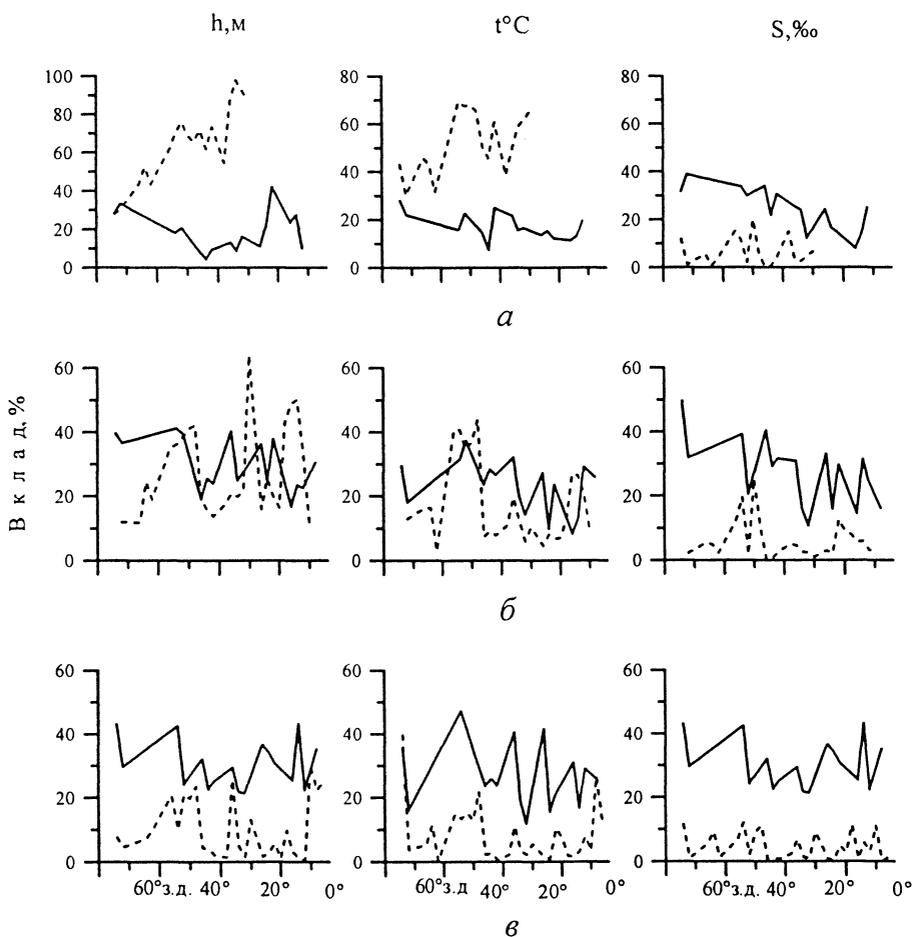


Р и с. 4. Среднемноголетнее распределение температуры на изопикнических поверхностях (слева) и ее среднеквадратические отклонения (справа): а –  $\sigma_t = 26,0$  ед. усл. пл.; б –  $\sigma_t = 26,5$  ед. усл. пл.; в –  $\sigma_t = 27,0$  ед. усл. пл.; г –  $\sigma_t = 27,5$  ед. усл. пл.

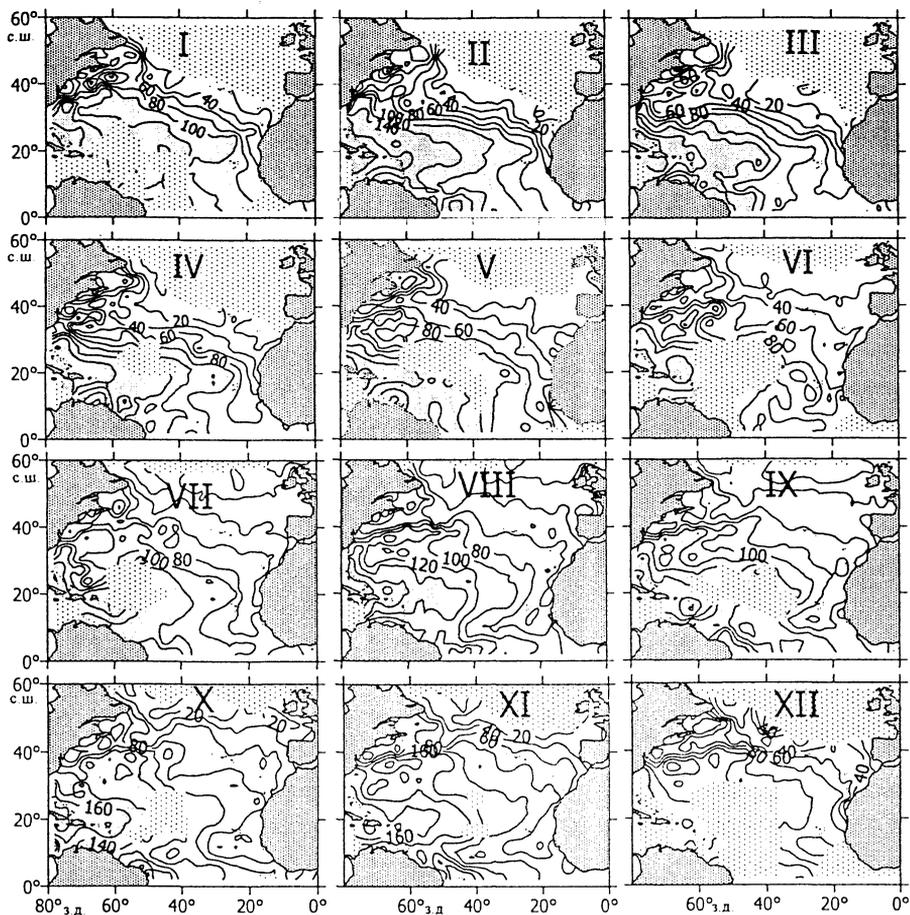


Р и с. 5. Среднегодовое распределение солёности на изопикнических поверхностях (слева) и ее среднеквадратические отклонения (справа): а –  $\sigma_t = 26,0$  ед. усл. пл.; б –  $\sigma_t = 26,5$  ед. усл. пл.; в –  $\sigma_t = 27,0$  ед. усл. пл.; г –  $\sigma_t = 27,5$  ед. усл. пл.

Изменчивость изопикнических характеристик. На большей части исследуемой акватории суммарные стандартные отклонения ( $h_{\sigma_i}$ ), ( $t_{\sigma_i}$ ) и ( $S_{\sigma_i}$ ), обусловленные сезонной и межгодовой изменчивостью, а также наличием шумов, составляют соответственно 15 – 25 м, 0,5°C, 0,1 – 0,2 ‰ (правые части рис. 3 – 5). Наибольшие отклонения от средних величин наблюдаются в северо-западном секторе ССАК – в окрестности Гольфстрима. Здесь эти отклонения достигают соответственно 35 – 40 м, 2,5 – 3,5°C и 0,8 – 1,0 ‰. При этом самые большие отклонения от среднемноголетнего уровня  $h_{\sigma_i}$ , достигающие 40 м, имеют место на изопикнической поверхности  $\sigma_t = 26,5$ . Величины же максимальных отклонений температуры воды и солёности от климатической нормы меняются от 3,5 – 4,5°C и 0,8 – 1,0 ‰ на изопикнических поверхностях 26,0 – 27,0 ед. усл. пл. до 2,5°C и 0,4 ‰ – на изопикнической поверхности 27,5 ед. усл. пл.

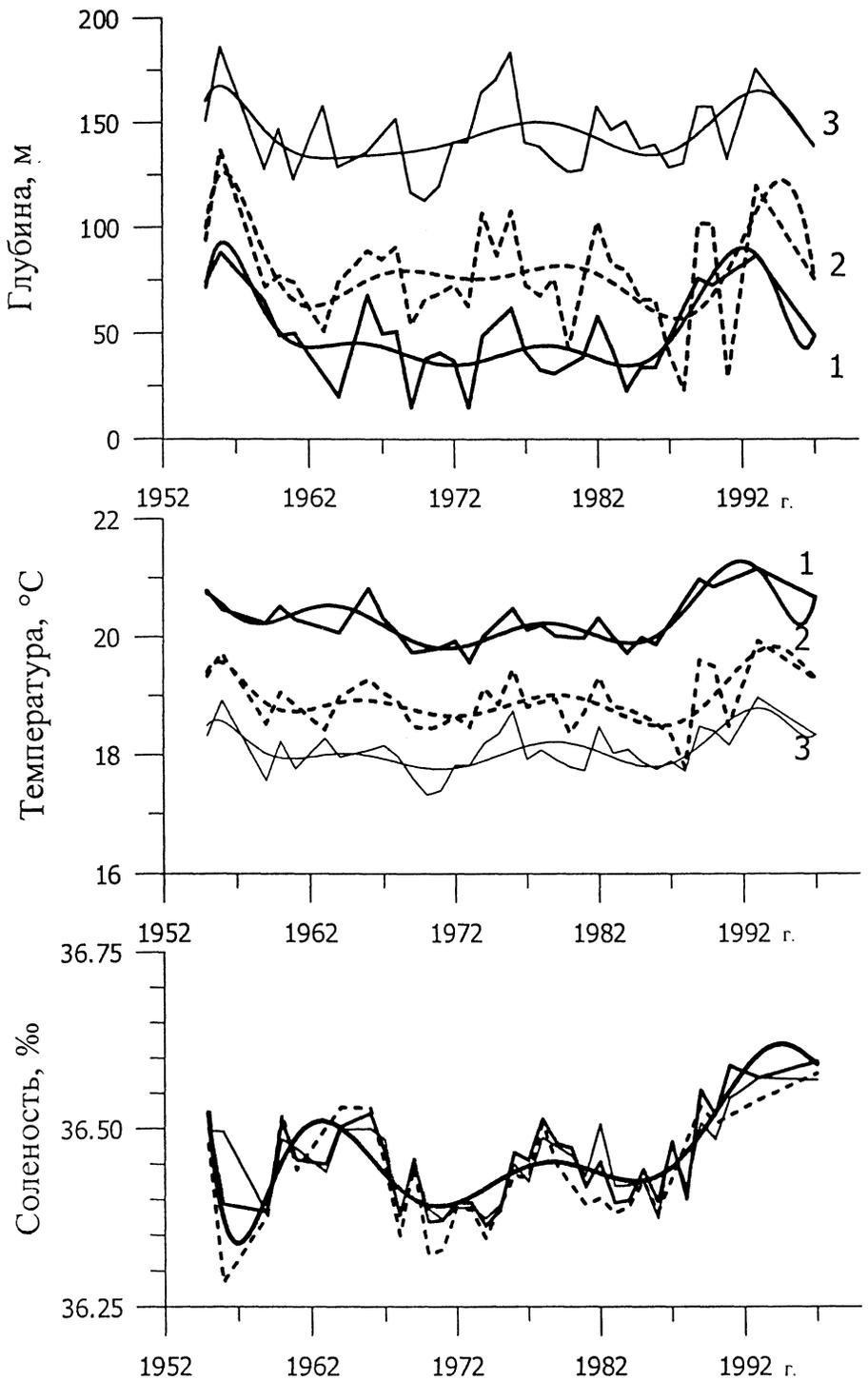


Р и с. 6. Вклад (%) межгодовых (сплошные линии) и сезонных (штриховые) изменений в общую дисперсию изопикнических характеристик на 36° с.ш.: а –  $\sigma_t = 26,5$  ед. усл. пл.; б –  $\sigma_t = 27,0$  ед. усл. пл.; в –  $\sigma_t = 27,5$  ед. усл. пл.



Р и с. 7. Среднеголетние месячные поля топографии изопикнической поверхности  $\sigma_t = 26,5$  ед. усл. пл.

На рис. 6 приведено распределение вклада сезонных и межгодовых флуктуаций  $h_{\sigma_t}$ ,  $t_{\sigma_t}$ ,  $S_{\sigma_t}$  в окрестностях наиболее обеспеченной наблюдениями широтной зоны по  $36^\circ$  с.ш. В верхней части пикноклина доминирует внутригодовая изменчивость. Так, вклад сезонных колебаний  $h_{\sigma_t}$ ,  $t_{\sigma_t}$  на изоповерхности  $\sigma_t = 26,5$  ед. усл. пл. достигает соответственно 70 и 90 % общей изменчивости, тогда как доля межгодовых флуктуаций  $S_{\sigma_t}$  изменяется в пределах 10 – 30 % общей дисперсии. С увеличением глубины из-за ослабления сезонной изменчивости межгодовая изменчивость этих характеристик становится доминирующей. Примечательно, что на всех исследуемых изопикнических поверхностях сезонные изменения солености играют пренебрежимо малую роль, их вклад лишь в отдельных точках достигает 20 % общей дисперсии, тогда как доля межгодовых флуктуаций изменяется в пределах 20 – 40 % общей дисперсии. Оставшаяся часть дисперсии обусловлена шумами различного типа.



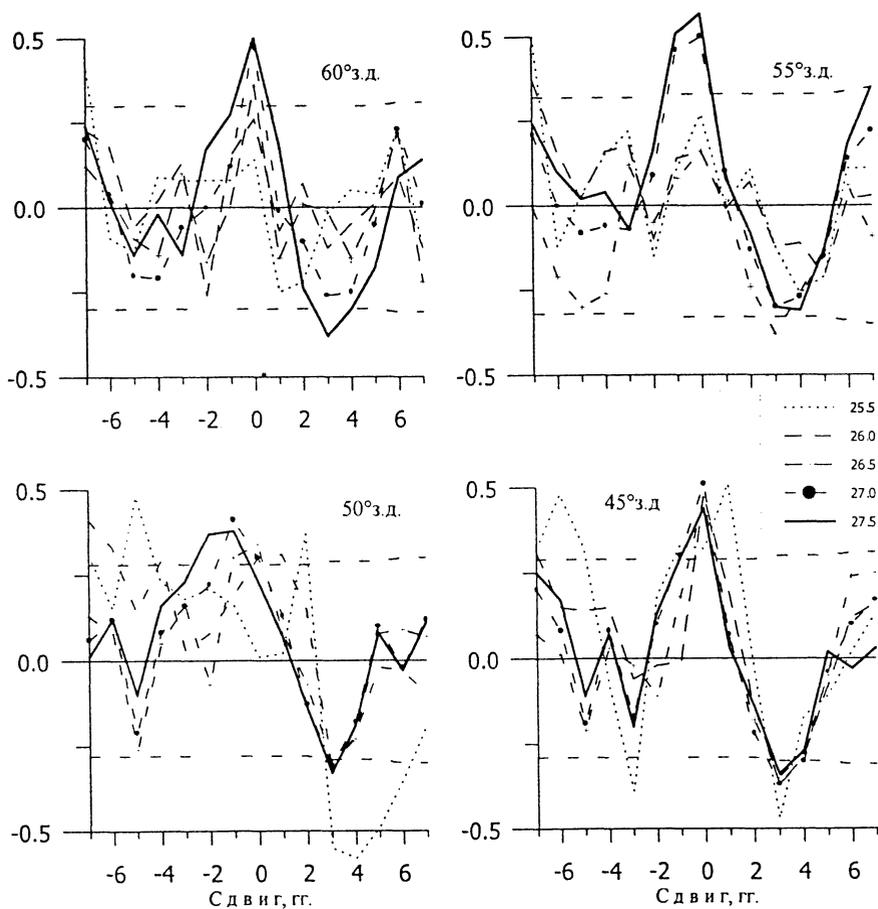
Р и с. 8. Межгодовые колебания характеристик изопикнических поверхностей на 36°с.ш. и 50°з.д. (ломаные кривые): 1 –  $\sigma_t = 26,0$  ед. усл. пл.; 2 –  $\sigma_t = 26,5$  ед. усл. пл.; 3 –  $\sigma_t = 27,0$  ед. усл. пл. Сглаженные кривые – аппроксимации полиномом 9-й степени

Сезонная эволюция топографии изопикнических поверхностей верхней части пикноклина (рис. 7) заключается в том, что летом и осенью имеет место некоторое заглубление ложбинной области, соответствующей ССАК. В этот период хорошо выделяются указанные выше гребни: гребень, отделяющий Гольфстрим от основной области ССАК, а также гребень, оконтуривающий Западно-Африканский апвеллинг, Северное Пассатное течение и Межпассатное противотечение. В это же время года хорошо выделяется область антициклонического разворота Северного Бразильского течения. Зимой и весной расчлененность северной части ССАК ослабевает, а топографический гребень, оконтуривающий Западно-Африканский апвеллинг, Северное Пассатное течение и Межпассатное противотечение, исчезает полностью, что указывает на практическое прекращение существования СТЦК. Исчезают и топографические признаки разворота Северного Бразильского течения на восток. Это свидетельствует об общем ослаблении геострофической циркуляции в тропической зоне Северной Атлантики. Вместе с тем принципиальных качественных сезонных изменений в полях температуры и солёности на изопикнических поверхностях не наблюдается.

На рис. 8 показаны межгодовые вариации характеристик изоповерхностей верхней части термоклина, вычисленные для одного из узлов сетки района, наиболее полно обеспеченного данными измерений. Для более надежного выделения низкочастотных колебаний (с периодами, превышающими 2 – 3 года) использованы полиномы 9-й степени. Видно, что межгодовые колебания изопикнических характеристик во всем исследуемом слое практически синфазны и представляют собой суперпозицию флуктуаций с теми же периодами, которые характерны и для колебаний индексов САК (т.е. 2 – 3 года и 6 – 8 лет). Кроме этого, явно выделяется периодичность 10 – 12 лет. Типичный размах межгодовых флуктуаций величин  $h_{\sigma}$ ,  $t_{\sigma}$ ,  $S_{\sigma}$  составляет соответственно 20 – 25 м, 1 – 1,5°C и 0,25 ‰. Возникает вопрос о взаимосвязанности САК и изменчивости изопикнических характеристик в Северной Атлантике на разных временных масштабах, к рассмотрению которого мы и переходим.

Межгодовая изменчивость изопикнических характеристик и Североатлантическое колебание. Взаимные корреляционные функции в диапазоне сдвигов, меняющихся от –7 до +7 лет, вычисленные для 5-градусных узлов, наиболее обеспеченных данными измерений, показывают (рис. 9), что имеет место положительная синхронная связь между колебаниями индекса САК и топографии изопикнической поверхности в области ССАК. На это указывают пики, превышающие 90%-ный доверительный уровень при нулевых сдвигах. Примечательно, что взаимные корреляционные функции, вычисленные для флуктуаций температуры на анализируемых изопикнах (рис. 10), ведут себя аналогичным образом. Это свидетельствует о наличии субдукции в области нисходящих упорядоченных движений, где одновременно наблюдается и заглубление изопикн. Положительный знак при нулевых сдвигах в области

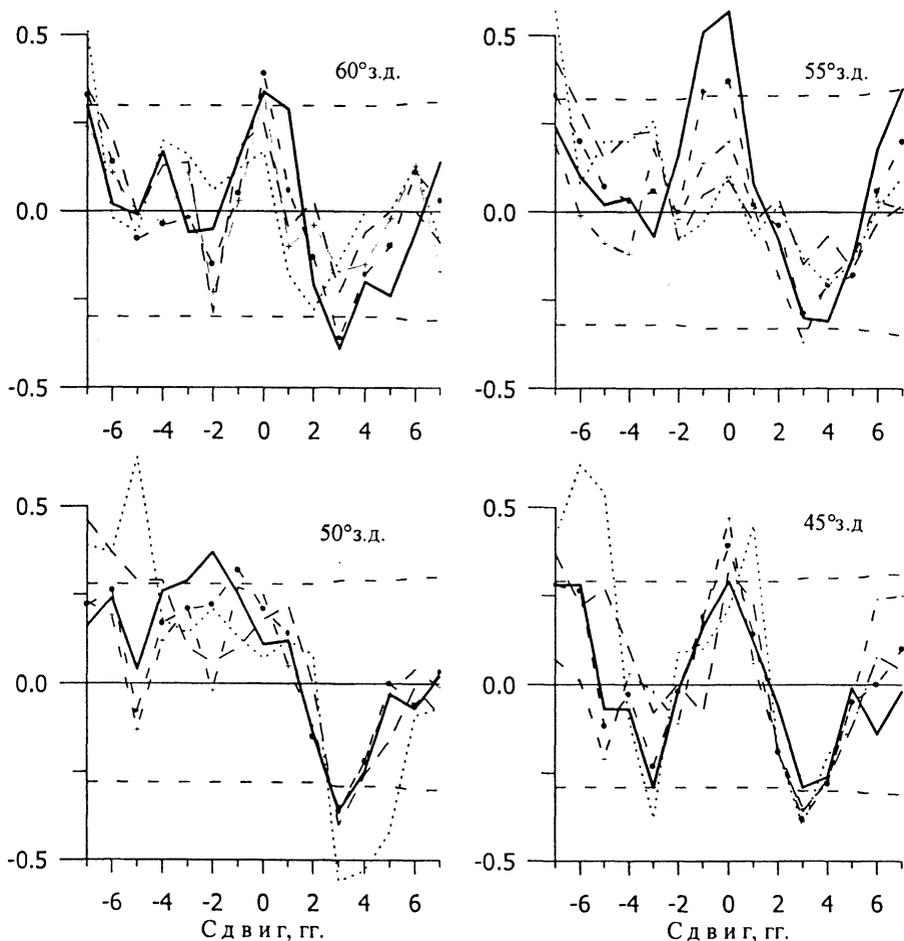
обсуждаемых пиков указывает на то, что интенсификация атмосферной циркуляции в субтропиках ведет к увеличению температуры на изопикнах и одновременному заглублению этих изопикнических поверхностей. Это представляется естественным, поскольку при усилении САК в Субтропической Атлантике происходит, с одной стороны, заглубление термоклина, а с другой – субдукция относительно теплых вод в термоклин, а в дальнейшем – их изопикническая адвекция [5, 6].



Р и с. 9. Функции взаимной корреляции межгодовых колебаний индекса САК и глубин залегания изопикнических поверхностей на 36°с.ш. Горизонтальные штриховые линии – 90%-ный доверительный интервал

Необходимо подчеркнуть, что наряду с пиками во взаимных корреляционных функциях, имеющими место при нулевых сдвигах между индексом САК и изопикническими характеристиками, выделяются значимые отрицательные экстремумы при трехлетнем отставании индекса САК. Это указывает на то, что охлаждение пикноклина и его поднятие в центральной части ССАК сопровождается интенсификацией атмосферной циркуляции в средних широ-

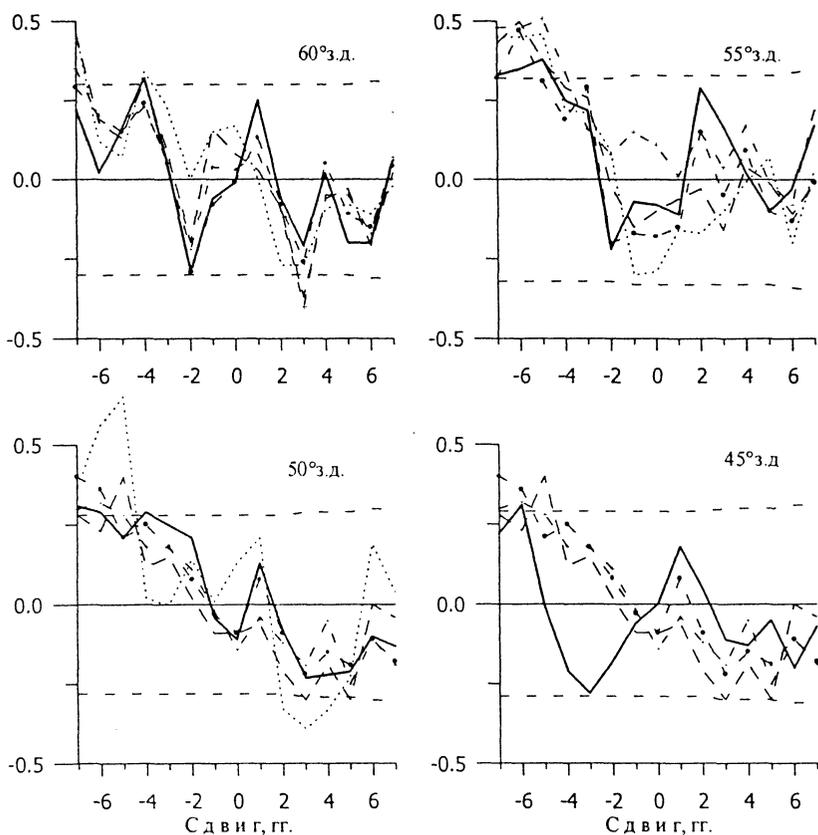
тах с запаздыванием в три года. При заглублении же пикноклина в центральной части ССАК и его адвективном прогреве следует ожидать, что через три года должно наблюдаться ослабление атмосферной циркуляции в средних широтах, а полный цикл изменчивости в североатлантической системе океан – атмосфера составляет ~ 6 – 8 лет. Этот результат прямо указывает на то, что океан играет активную роль в формировании межгодовой (~ 6 – 8-летней) изменчивости атмосферных характеристик в Северной Атлантике. Подробное обсуждение механизма, формирующего такую периодичность, приведено в [2].



Р и с. 10. Функции взаимной корреляции межгодовых колебаний индекса САК и температуры воды на изопикнических поверхностях на 36°с.ш. Легенду см. на рис. 9

Помимо указанных экстремумов практически на всех графиках, вычисленных для северо-западной части ССАК (60 – 55° з.д.), выделяются значимые положительные экстремумы при 6 – 7-летнем лидировании САК. Это позволяет предполагать, что интенсификация атмосферной

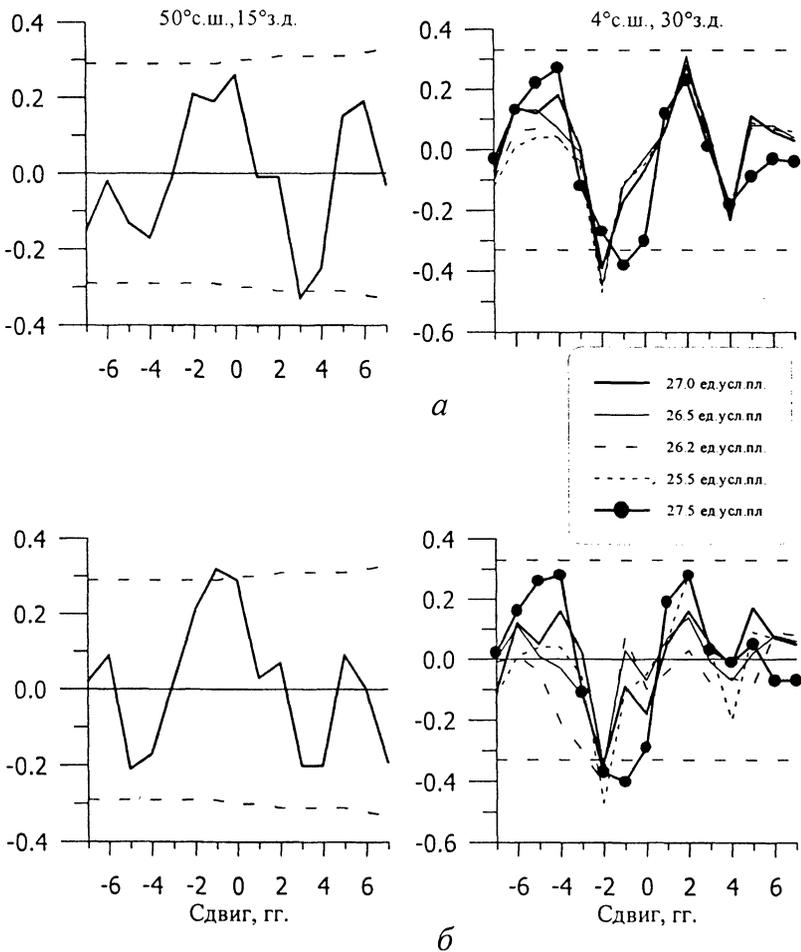
циркуляции в средних широтах на межгодовом масштабе изменчивости может приводить к тому, что в северо-западной части ССАК через 6 – 7 лет будет наблюдаться опускание пикноклина и его нагрев. Ослабление же атмосферной циркуляции в средних широтах будет приводить через 6 – 7 лет к подъему пикноклина и его охлаждению в северо-западной части ССАК.



Р и с. 11. Функции взаимной корреляции межгодовых колебаний индекса САК и солёности на изопикнических поверхностях на 36°с.ш. Легенду см. на рис. 9

Коррелированность межгодовых колебаний солёности и атмосферной циркуляции (характеризуемой индексом САК) в целом ниже, чем отмеченная выше коррелированность колебаний индексов САК с колебаниями глубин залегания изопикн и температуры на них (рис. 11). На большей части оси абсцисс флуктуации взаимных корреляционных функций, вычисленных для рядов  $\{\bar{S}_{\text{год}}\}$ ,  $\{I_{\text{САК}}\}$ , не выходят за 90%-ный доверительный уровень. Вместе с тем положительная корреляция, превышающая названный доверительный уровень, имеет место при 5 – 7-летнем лидировании индекса САК. Это означает, что при интенсификации атмосферной циркуляции в средних широтах через 5 – 7 лет следует ожидать повышения солёности в верхней части пикноклина центральной области ССАК.

Наличие 5 – 7-летнего запаздывания в изменчивости изопикнических характеристик относительно вариаций индекса САК предполагает формирование в спектрах флуктуаций изопикнических характеристик и индекса САК пиков на периодах  $\sim 12$  лет. Однако многочисленные исследования спектрального состава индекса САК не обнаруживают значимой изменчивости такого периода. Продолжительность имеющихся рядов изопикнических характеристик недостаточна для выделения на значимом статистическом уровне соответствующих периодичностей. Тем не менее на временных реализациях (рис. 8) они явно видны. По всей видимости, такая изменчивость в океанических характеристиках (если она не является случайной) не связана с САК, а представляет собой внутреннюю океаническую моду, не влияющую явным образом на изменение атмосферных характеристик.



Р и с. 12. Функции взаимной корреляции межгодовых колебаний в средних широтах и в тропической зоне: а – индекса САК и глубин залегания изопикнических поверхностей; б – индекса САК и температуры на изопикнических поверхностях

Взаимные корреляционные функции, вычисленные для северо-восточной части Северной Атлантики (левые части рис. 12), указывают на существование положительного экстремума при сдвигах САК, близких к нулевым, а также подтверждают наличие проанализированной выше 6-летней периодичности. Отметим вместе с тем отсутствие пика при 6 – 7-летнем лидировании САК.

Графики функций взаимной корреляции межгодовых вариаций САК и изопикнических характеристик, вычисленные для тропической зоны Северной Атлантики (правые части рис. 12), характеризуются (в отличие от субтропической зоны и средних широт) наличием значимых отрицательных экстремумов при двухлетнем лидировании САК. Таким образом, в Тропической Атлантике атмосфера играет лидирующую роль. Это проявляется в том, что интенсификация САК сопровождается подъемом термоклина и его охлаждением через два года.

В заключение отметим, что результаты анализа корреляционных функций в целом согласуются с выводами работы [2], в которой выполнен аналогичный анализ вариаций теплозапаса деятельного слоя для различных структурных зон Северной Атлантики. Как следует из результатов настоящей работы, межгодовые изменения температуры носят квазиизопикнический характер.

## Выводы

Основные результаты выполненной работы можно сформулировать следующим образом.

1. Топография изопикнических поверхностей верхней части термоклина хорошо очерчивает известные звенья крупномасштабной циркуляции, такие, в частности, как основная струя Гольфстрима, рециркуляционное звено Гольфстрима, Северное Пассатное течение и Межпассатное противотечение, а также область антициклонического разворота Северного Бразильского течения.

2. В верхней части пикноклина доминирует внутригодовая изменчивость. Здесь вклад сезонных колебаний глубины залегания и температуры изопикнических поверхностей достигает соответственно 70 и 90% общей изменчивости, тогда как доля межгодовых флуктуаций солёности изменяется в пределах 10 – 30% общей дисперсии. С увеличением глубины из-за ослабления сезонной изменчивости межгодовая изменчивость этих характеристик становится доминирующей. На всех изопикнических поверхностях верхней части пикноклина сезонные изменения солёности играют пренебрежимо малую роль, их вклад лишь в отдельных точках достигает 20% общей дисперсии, тогда как доля межгодовых флуктуаций изменяется в пределах 20 – 40% общей дисперсии.

3. Межгодовые колебания изопикнических характеристик во всем исследуемом слое практически синфазны и представляют собой суперпозицию флуктуаций с периодами 2 – 3 года, 6 – 8 и 10 – 12 лет. Типичный размах этих флуктуаций для глубин залегания изопикнических поверхностей, изопикнической температуры и солёности составляет 20 – 25 м, 1 – 1,5°C и 0,25 % соответственно.

4. Интенсификация атмосферной циркуляции в средних широтах сопровождается синхронным заглублением пикноклина и его нагреванием в центральных частях ССАК, а ослабление атмосферной циркуляции – поднятием пикноклина и его охлаждением.

5. Наличие значимых положительных и отрицательных корреляций при лидировании и запаздывании индекса САК говорит о том, что имеют место прямая и обратная связи между откликами пикноклина на флуктуации интенсивности атмосферной циркуляции и откликами атмосферы на колебания, происходящие в пикноклине. Полный цикл взаимодействия САК с аномалиями изопикнических характеристик с учетом времени их адвекции составляет ~ 6 – 8 лет. При этом соответствующие изменения температуры в пикноклине носят квазиизопикнический характер.

6. Для уточнения характера и природы 10 – 12-летней изменчивости характеристик пикноклина необходимы дополнительные исследования с привлечением более продолжительных рядов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полонский А.Б., Семилетова Е.П., Джиганшин Г.Ф. Роль океана в поддержании Североатлантического колебания // Морской гидрофизический журнал. – 2002. – №5. – С. 47 – 54.
2. Джиганшин Г.Ф., Полонский А.Б. Североатлантическое колебание и изменчивость характеристик деятельного слоя океана // Известия РАН. ФАО. – 2003. – 39, №4. – С. 547 – 557.
3. Bjerknes J. Air-sea interaction in the North Atlantic // Adv. Geophys. – 1964. – 10, №1. – P. 1 – 82.
4. Полонский А.Б., Башарин Д.В., Воскресенская Е.Н. и др. Североатлантическое колебание: описание, механизмы, влияние на климат Евразии // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – №1. – С. 28 – 40.
5. Zhang D., McPhaden M.J., Johns W.E. Observational evidence for flow between the Subtropical and Tropical Atlantic: The Atlantic subtropical cells // J. Phys. Oceanogr. – 2003. – 33, №.8. – P. 1783 – 1796.
6. Picaut J., Delcroix T., Edlin G. et al. Proceeding of the international workshop on the Low-Frequency Modulation of ENSO (held at Lebos/OMP, Toulouse, France, 23 – 25 September). – 2004. – 62 p.
7. Стомелл Г. Обзор теории морских течений // Проблемы океанической циркуляции. – М.: Мир, 1965. – С. 5 – 14.
8. Schlitzer R. Ocean-Data-View. – <http://www.awi-bremerhaven.de/GEO/ODV>, 2001.
9. О введении Шкалы практической солёности, 1978 и нового международного уравнения состояния морской воды, 1980 // Океанология. – 1982. – XXII, вып. 2. – С. 337 – 343.

10. *Climate Diagnostics Bulletin*. U.S.Department of Commerce, Camp Spring, Maryland, 1990 – 2000.
11. *Worthington L.V.* Three detailed cross-sections of the Gulf Stream // *Tellus*. – 1956. – 6. – P. 116 – 123.
12. *Джиганшин Г.Ф., Полонский А.Б.* Кинематическая структура и расходы течений в деятельном слое северо-западной части Тропической Атлантики // *Морской гидрофизический журнал*. – 1996. – № 2. – С. 27 – 42.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь

Материал поступил  
в редакцию 10.11.05

ABSTRACT Seasonal and interannual variations of basic pycnocline characteristics in the range  $\sigma = 25.5 - 27.5$  are investigated based on the processing of the North Atlantic oceanographic data for 1950 – 1999 (~ 500 000 stations). It is shown that their interannual fluctuations in the whole layer under study represent a superposition of the fluctuations with the periods from 2 – 3 years to 10 – 12 years. Typical fluctuation magnitudes of the depth of isopycnal surfaces, temperature and salinity are 20 – 25 m, 1 – 1.2°C and 0.25 ‰, respectively. Intensification of the atmospheric circulation at midlatitudes is accompanied by synchronous pycnocline deepening and its heating in the central part of the North Subtropical anticyclonic gyre, whereas weakening of the atmospheric circulation is followed by synchronous pycnocline elevation and its cooling. Complete cycle of interaction of the North Atlantic Oscillation with the anomalies of the pycnocline characteristics (with regard to its advection) is ~ 6 – 8 years.