

*Р.М.Хендри, И.М.Яшаяев, Р.А.Кларк,
Дж. Р.Н.Лазир (Бедфордский
океанографический институт,
г.Дартмут, Канада)*

ОСОБЕННОСТИ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ АТЛАНТИКЕ

Введение

Зимнее выхолаживание вод и испарение в районе Лабрадорского моря ведут к образованию в результате конвекции четко выраженной промежуточной водной массы вод Лабрадорского моря (ВЛМ). Значительные межгодовые колебания их объема и свойств вызваны изменениями факторов внешней среды (Lazier, 1988, 1995).

Ограниченное количество прямых измерений в западной части Лабрадорского моря позволяет сделать предположение о существовании мощного переноса ВЛМ в южном направлении, что ассоциируется с глубоководным Лабрадорским течением, наблюдающимся в промежуточных слоях. Вместе с глубинным западным пограничным течением, прослеживаемым на еще больших глубинах, оно образует систему западного пограничного течения, которая является частью субполярного круговорота (Lazier, Wright, 1992). Океанографические исследования показывают, что ВЛМ распространяются в промежуточных слоях по всей Северной Атлантике и характеризуются низкой соленостью и минимальной потенциальной завихренностью, т.е. слабой вертикальной плотностной стратификацией (McCartney, Talley, 1982). Их влияние проявляется особенно сильно вдоль западной границы северной части Атлантического океана, они являются важным компонентом района склоновых вод, простирающегося от м.Гаттерас до Ньюфаундлендских банок между Гольфстримом на юге и континентальным склоном на севере (Loder, Petrie, Gawarkiewicz, 1998). Свойства склоновых вод определяются соотношением количества североатлантических центральных вод из субтропического круговорота на юге и более холодных опресненных вод северного происхождения, включающих в себя как шельфовое Лабрадорское течение, так и поток ВЛМ в промежуточных слоях (McClellan, 1957). Можно предположить, что

изменения объема переноса и характеристик ВЛМ ведут к трансформации склоновых вод.

Долгопериодные колебания гидрологических условий прибрежной части океана ведут к изменениям параметров популяций рыб и поэтому вызывают большой интерес ученых. Б.Петри и Л.Дринкуотер (Petrie, Drinkwater, 1993) предположили, что изменения свойств вод на новошотландском шельфе в 50-60-е годы связаны с усилившимся переносом вод Лабрадорского течения. Апвеллинг в районе кромки шельфа и кросс-шельфовое перемешивание обеспечивают связь между водами прибрежной зоны и открытого моря. Поэтому необходимо более полно представлять механизмы, определяющие свойства склоновых вод, включая влияние на них ВЛМ.

В настоящей работе представлены результаты предварительного статистического анализа долгопериодных изменений свойств ВЛМ в северо-западной части Северной Атлантики за последние 40 лет.

Источники данных и подготовка временных рядов

Для того, чтобы собрать данные всех океанографических станций, выполненных в Лабрадорском море, Ньюфаундлендском бассейне и в районе к югу от Ньюфаундленских банок вдоль меридиана 50° з.д., были предприняты совместные усилия. В результате был сформирован значительный объединенный массив данных для анализа долгосрочных изменений свойств океанических вод в этих районах (Clarke, Yashayaev, 1998; Yashayaev, 1998). Он включает данные более 8 тыс. станций в Лабрадорском море и свыше 28 тыс. станций в районах Ньюфаундлендского бассейна/ 50° з.д. Эта информация используется для предварительного статистического анализа долгопериодных колебаний в промежуточном плотностном слое, связанном с водной массой Лабрадорского моря.

В наших исследованиях использовались временные ряды показателей, характеризующих свойства водных масс Лабрадорского моря, Ньюфаундлендского бассейна и района вдоль меридиана 50° з.д. Внимание было сосредоточено на периоде с 1960 по 1995 г., что обусловлено наличием в это время большого количества данных по обширной акватории. В работе рассматривались 14 частично перекрывающихся между собой районов 2 в Лабрадорском море и 12 в более южных широтах Ньюфаундлендского бассейна и прилегающего участка вдоль 50° з.д. (рис.1). Выбор районов производился на основе компромисса между стремлением обеспечить хорошее пространственное разрешение и ограниченностью имеющихся данных.

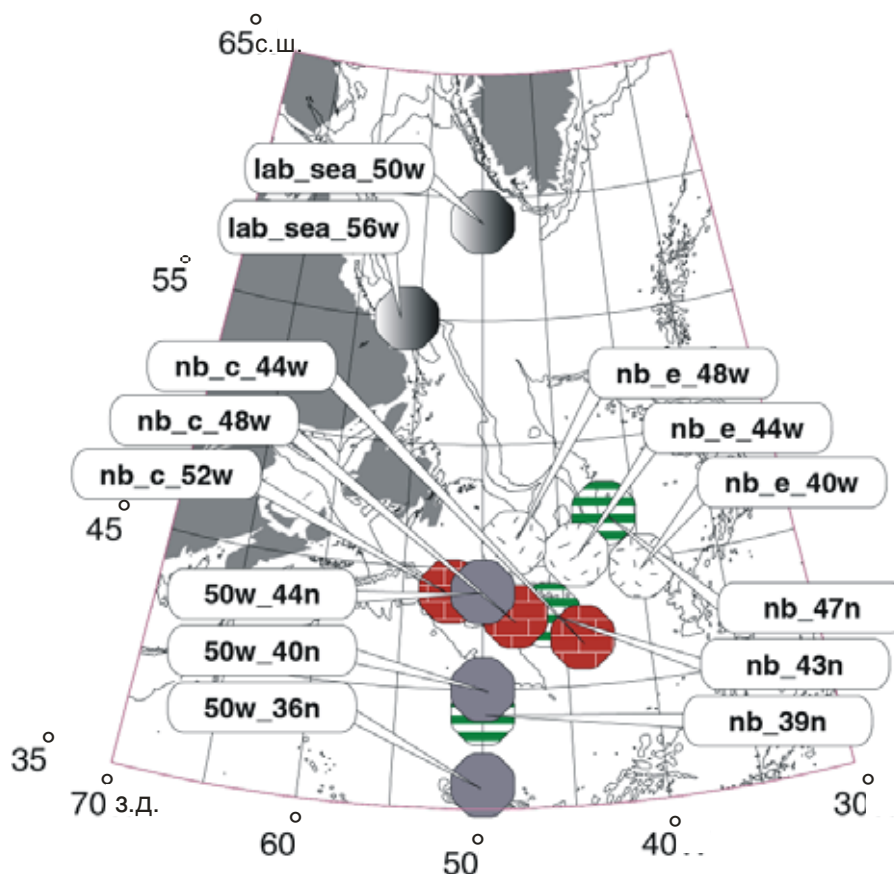


Рис.1. Карта северо-западной части Северной Атлантики с указанием 14 районов Лабрадорского моря (lab sea), Ньюфаундлендского бассейна (nb) и района к югу от Ньюфаундлендских банок вдоль 50° з.д., для которых был выполнен анализ многолетних данных о температуре и солёности

Была сделана попытка определения пространственных границ ВЛМ путем выбора слоев на основе аномалий потенциальной плотности относительно поверхности 2000 дбар (сигма-2). В Лабрадорском море значения сигма-2 для ядра ВЛМ определялись для каждого года отдельно на основании температуры и солёности их максимальной по объёму части, ограниченной T,S-пространством для соответствующего общего диапазона изменений плотности ВЛМ. Выбранные диапазоны варьировали от 36,85-36,88 до 36,92-36,95. Для каждой станции характеристики осреднялись по области значений сигма-2 с характерным диапазоном 0,03 и центрировались по выбранному годовому значению. Ограниченные в пространстве и времени медианные значения использовались для формирования временных рядов в целях выполнения дальнейшего анализа.

На рис.2 представлено распределение аномалий потенциальной плотности (сигма-0) летом 1998 г. на разрезе, пересекающем Лабрадорское море от банки Гамильтон до южной оконечности Гренландии (данные НИС

«Гудзон»). Слой сигма-2 ВЛМ выделен штриховкой. По данным измерений 1998 г., значения сигма-2, необходимые для расчета температуры и солёности ВЛМ, составили 36,91 и 36,94. Для общего анализа с каждой станции брали по одному значению температуры и солёности.

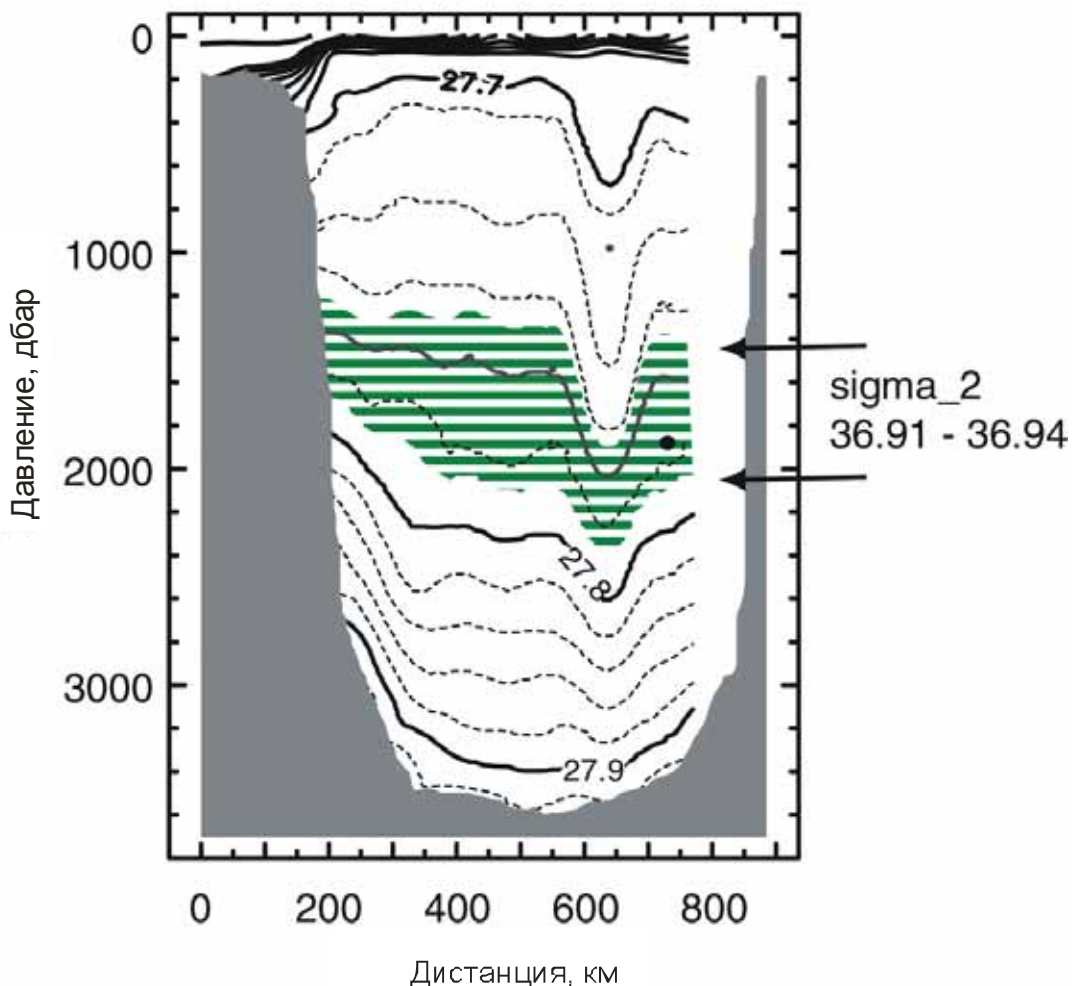


Рис.2. Аномалия потенциальной плотности в Лабрадорском море (сигма-0) на разрезе от банки Гамильтон до южной оконечности Гренландии (по данным НИС Гудзон, 1998 г.). Штриховка между аномалиями плотности относительно поверхности 2000 дбар (сигма-2), соответствующими значениям 36,91 и 36,94, показывает локализацию слоя, в котором располагается ядро ВЛМ. Этот слой использовался для расчета репрезентативных показателей температуры и солёности ВЛМ в 1998 г., необходимых для формирования многолетних рядов исходных характеристик

Для исследований были выбраны два района Лабрадорского моря. Первый из них (lab_sea_56w) расположен в западной части, где происходит активная конвекция, а второй (lab_sea_50w) – в центральном районе Лабрадорского моря, куда распространяются продукты конвекции после стадии формирования. Анализировались станции, расположенные в

пределах примерно 150 км от центра каждого района. По данным всех станций, выполненных в районе за определенный сезон конкретного года, рассчитывались медианные значения температуры и солености в слое распространения ВЛМ. Это было сделано для того, чтобы получить репрезентативные показатели температуры и солености. Затем формировались временные ряды, пробелы продолжительностью до 2 лет заполнялись с помощью линейной интерполяции.

Для 12 южных районов во всех случаях был выбран фиксированный диапазон значений сигма-2 (36,85-36,92). Были рассчитаны осредненные по районам значения температуры и солености в слое и сформированы временные ряды. Южные районы выбирались в области расположения четырех разрезов. В Ньюфаундлендском бассейне два разреза ориентированы с востока на запад, nb_e восточный проходит из открытых районов к банке Флемиш Кап, а nb_c центральный совпадает с традиционным разрезом, выполняемым Бедфордским институтом океанографии (БИО), и проходит от центральной части Ньюфаундлендского бассейна в сторону склоновых вод, пересекая Юго-Восточный Ньюфаундлендский хребет. Отрезок разреза nb_c, расположенный в Ньюфаундлендском бассейне, в 1972 г. был объектом детальных исследований (Current system..., 1980), позволивших получить подробную картину океанографических условий в этом районе. Между 1993 и 1995 гг. вдоль разреза были выполнены многократные океанографические наблюдения, здесь же была установлена серия буйковых станций с регистраторами течений типа АСМ6 (часть региональных исследований, проводившихся по проекту WOCE) (Clarke, Hendry, Yashayaev, 1998). Третий разрез (50w) проходит от Ньюфаундлендских банок на юг и пересекает Гольфстрим. Четвертый разрез (nb) располагается по диагонали с северо-востока на юго-запад и пересекает три указанных выше южных разрезов.

На рис.3 представлены средние за период с 15 октября по 6 ноября 1994 г. значения переноса вод через разрез, пересекающий Ньюфаундлендский бассейн. Они получены БИО с помощью серии буйковых станций, оснащенных регистраторами течений АСМ6. Наложённая на рисунок затушеванная область обозначает слой ВЛМ со значениями сигма-2 от 36,85 до 36,92, выделенный по данным измерений НИС «Гудзон». Объемный перенос на юго-запад оценен в 3,3 Св ($1 \text{ Св} = 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$), что является одним из немногих прямых измерений объемного переноса ВЛМ.

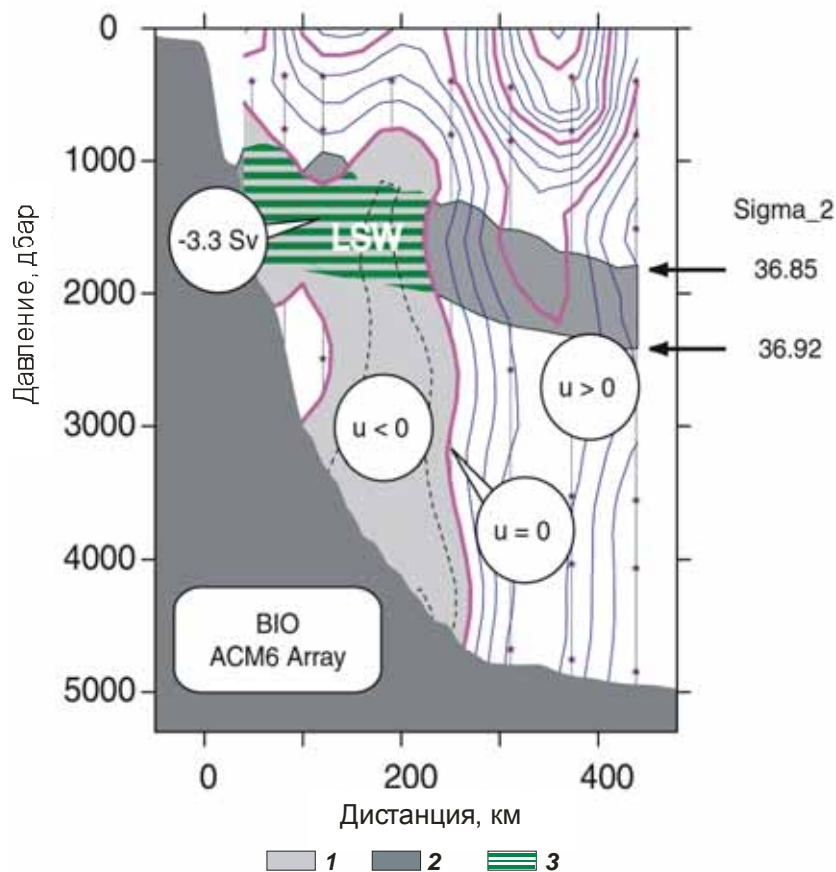


Рис.3. Средние за период с 15 октября по 6 ноября 1994 г. значения переноса вод через разрез в Ньюфаундлендском бассейне по данным измерений течений регистраторами типа ACM6 (серия буйковых станций была установлена БИО в рамках программы WOCE). Течения, направленные на юго-запад (1), затушеваны. Более темный участок (2) показывает слой, соответствующий ВЛМ (значения сигма-2 от 36,85 до 36,92). Выделение слоя сделано на основе измерений на разрезе, выполненных НИС «Гудзон» в тот же период. Объемный перенос через заштрихованную область (3), представляющую собой зону пересечения слоя ВЛМ и течений юго-западных направлений, оценивается в 3,3 Sv

На рис.4а представлены межгодовые изменения температуры воды в двух районах Лабрадорского моря, причем обе кривые имеют заметное сходство. В течение первого десятилетия анализируемого периода температура увеличивалась и в 1971 г. достигла максимума, затем последовал 5-летний период резкого охлаждения с относительным минимумом в 1976 г. В последующие 12 лет изменения были менее выраженными, однако в 1988 г. начался период охлаждения, завершившийся в 1995 г., температура при этом достигла самых низких значений за всю историю наблюдений. В последующие годы отмечено незначительное потепление. На рис.4б показана соответствующая T,S-диаграмма для района lab_sea_56w в западной части Лабрадорского моря. Выявлено, что значения сигма-2, относящиеся к ВЛМ, заметно увеличились от 60-х годов к 90-м.

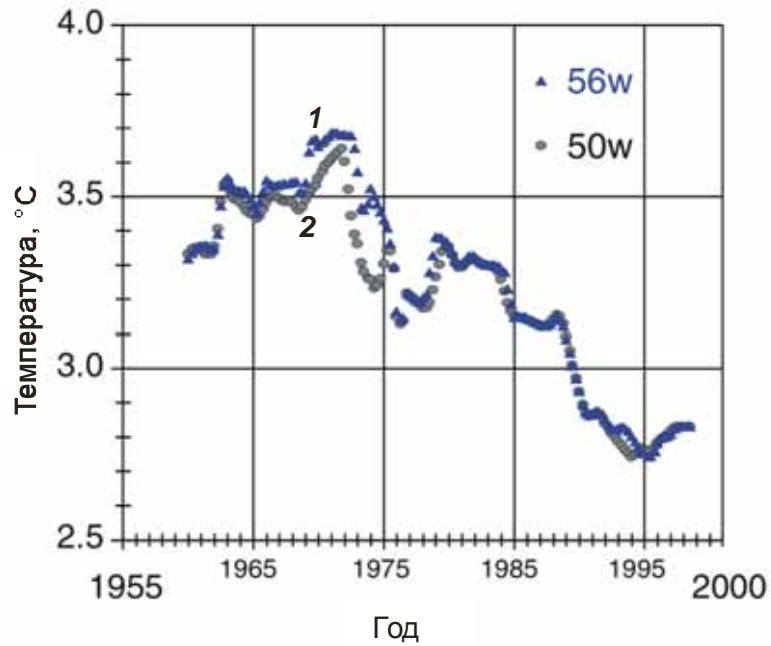


Рис.4а. Изменения температуры ВЛМ в районах Лабрадорского моря в 1960-1998 гг.: 1 – вдоль 56° з.д.; 2 – вдоль 50° з.д. Точками означены ограниченные в пространстве и времени медианные значения, полученные на основе имеющихся данных, для заполнения незначительных пробелов использовалась интерполяция

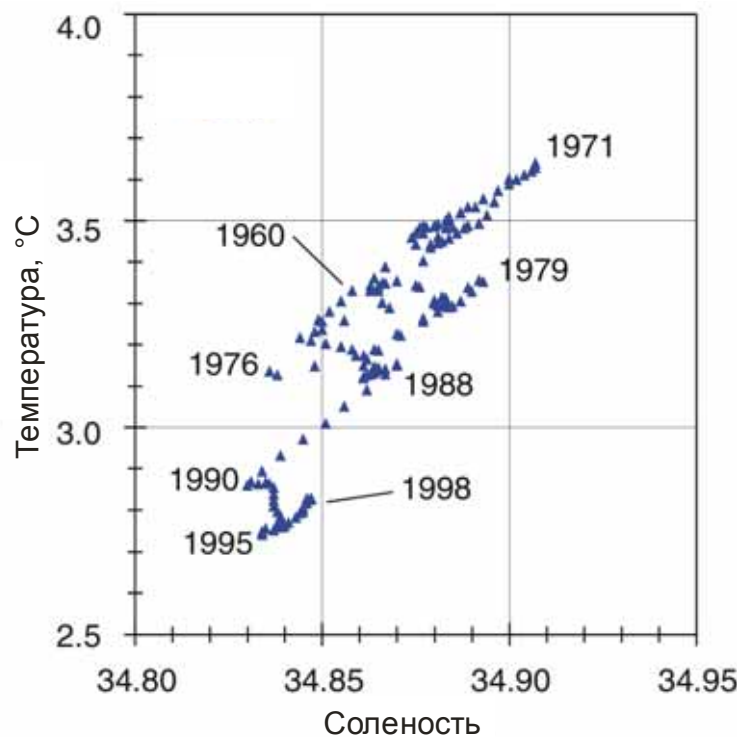


Рис.4б. T,S-диаграмма вод западной части Лабрадорского моря (lab_sea_56w) в 1960-1998 гг. (для отмеченных экстремумов указаны годы)

На рис.5а представлены изменения температуры в трех южных районах, расположенных вдоль 50° з.д. Их характер визуально схож с таковым для рядов температуры Лабрадорского моря (см.рис.4а). Показано, что температура ВЛМ постепенно повышается в направлении с севера на юг. Наблюдается сходство в изменениях температуры в указанных районах и Лабрадорском море (см.рис.4а).

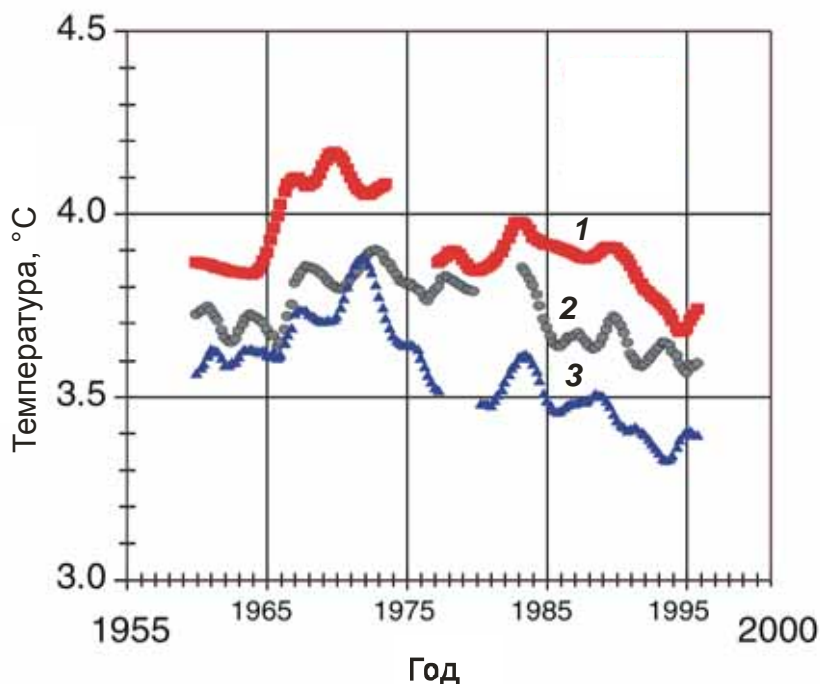


Рис.5а. Изменения температуры в трех анализируемых районах вдоль 50° з.д.:
1 – 36° с.ш.; 2 – 40° с.ш.; 3 – 44° с.ш. в 1960-1995 гг.

На рис.5б изображена T,S-диаграмма для самого северного участка в районе вдоль 50° з.д. (50° з.д., 44° с.ш.) с указанием лет для выявленных экстремумов. Приведенные значения температуры и солёности характеризуют свойства слоя сигма-2 в диапазоне солёности от 36,85 до 35,92.

Статистический анализ

Чтобы составить общее представление о пространственных связях изменений температуры и солёности, применялся метод эмпирических ортогональных функций (Wallace, Dickinson, 1973). Результаты для температуры и солёности оказались сходными, поэтому далее рассматриваются только температурные модели.

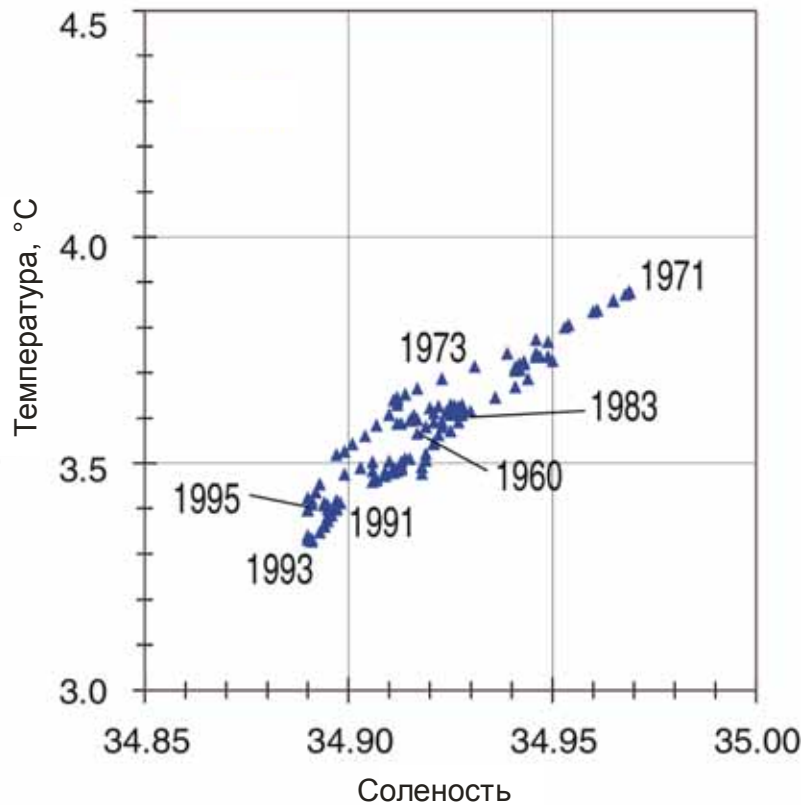


Рис.56. T,S-диаграмма для самого северного района вдоль 50° з.д. (50w_44n) за период с 1960 по 1995 г.

Первая эмпирическая модель (EOF1) объясняет 85 % от общей дисперсии температуры на 14 участках и обеспечивает количественное подтверждение визуального сходства, отмеченного в изменениях температуры воды в Лабрадорском море и районах вдоль 50° з.д. Модель EOF2 описывает еще 6 % дисперсии. Пространственная структура первой модели проиллюстрирована на рис.6, который представляет собой карту региона исследований с обозначенными на ней коэффициентами корреляции между EOF1 и временными рядами температуры по каждому району. На всех участках отмечается положительная связь, минимальное значение коэффициента корреляции составляет 0,79. Основная часть изменчивости характеризуется как пространственно однородное повышение или понижение температуры в слое ВЛМ по всему району исследований. Самые высокие коэффициенты корреляции отмечаются в западной части Лабрадорского моря (исходный район), связь настолько тесна, что не требуется оценивать ее статистическую значимость. В южных районах корреляция ослабевает по мере увеличения расстояния в направлении от побережья, что соответствует представлению о переносе ВЛМ на юг

системой западного пограничного течения и рециркуляции и/или диффузии этих вод в открытых районах.

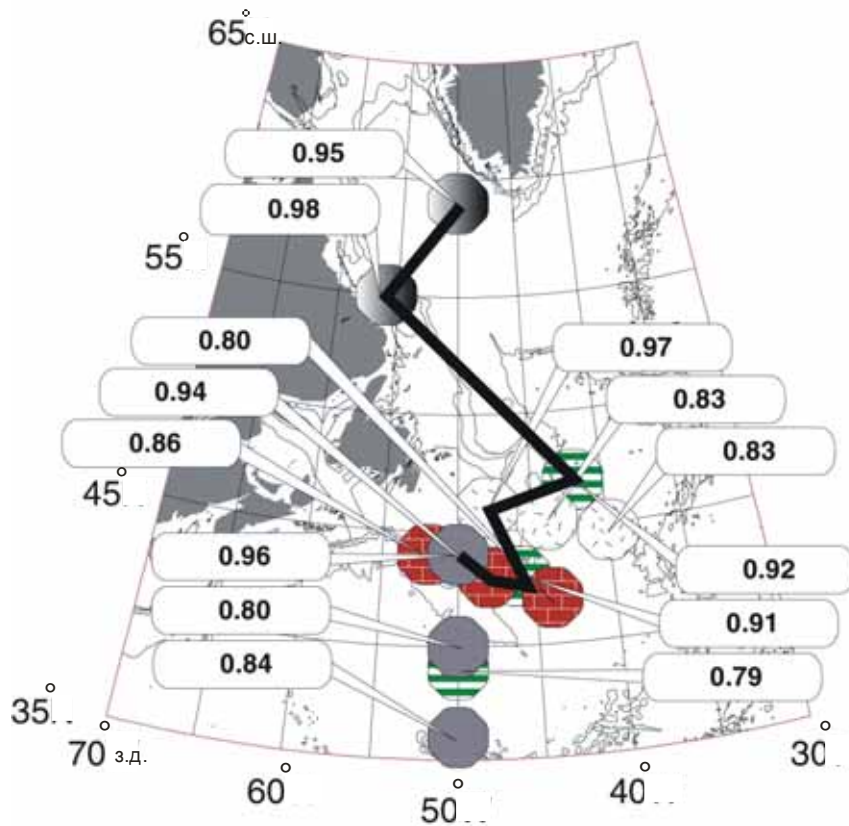


Рис.6. Пространственная структура первой эмпирической модели, рассчитанной на основе временных рядов температуры воды в 1960-1995 гг. для 14 районов. Пояснения в тексте

На рис.7а представлены межгодовые изменения EOF1. Временной ряд этой модели имеет тесное сходство с рядами температуры, что соответствует с высоким коэффициентам корреляции. Максимум 1971 г. соответствует высокой температуре ВЛМ, а минимум 1994 г. – низкой. Пунктирная кривая показывает изменения зимнего (декабрь-март) индекса САК (шкала перевернута), представляющего собой разность нормализованных значений давления на уровне моря между Лиссабоном (Португалия) и Стиккисхольмюрор/Рейкьявиком (Исландия). На рис.7б представлена диаграмма рассеяния годовых величин EOF1 по отношению к соответствующим значениям зимнего индекса САК, а также линия регрессии этих двух временных рядов. Коэффициент корреляции составляет минус 0,57, а это значит, что примерно 30 % дисперсии объясняется линейной связью. С физической точки зрения это имеет смысл, так как более высокие индексы САК ассоциируются с углублением Исландского

минимума, усилением северо-западных ветров над Лабрадорским морем, повышенной теплоотдачей в зимнее время и интенсификацией конвективного перемешивания (Long-term coordinated changes..., 1996). Временной ряд среднегодовых значений индекса САК, очевидно, содержит больше высокочастотных колебаний, чем EOF1. Температурная EOF2 (на рисунке не показана) также имеет выраженную высокочастотную составляющую, однако не столь сильно коррелирует с индексом САК.

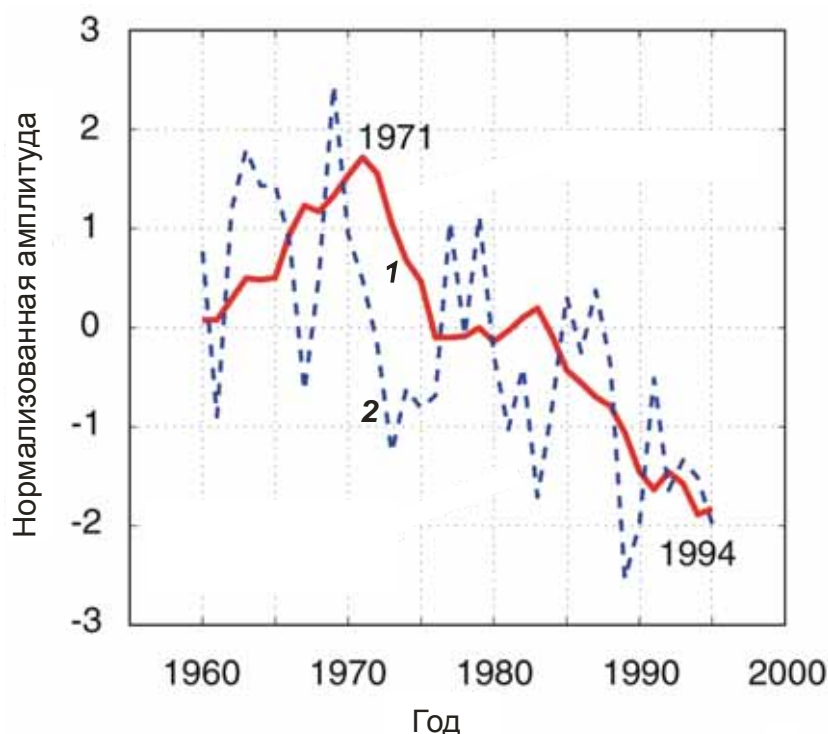


Рис.7а. Изменения нормализованной амплитуды первой эмпирической моды температуры (1) и изменения зимнего (декабрь-март) индекса САК (2), рассчитанного на основе нормализованных разностей давления на уровне моря между Лиссабоном (Португалия) и Стиккисхольмюр/Рейкьявиком (Исландия) (шкала перевернута). Данные Web-страницы http://goldhill.cgd.ucar.edu/cas/climind/nao_winter.html

Анализ эмпирических функций предполагает корреляцию только на нулевом временном сдвиге. Поскольку EOF1 объясняет большую часть дисперсии температуры, то была предпринята попытка провести простой корреляционный анализ со сдвигом исходных рядов температуры, для того чтобы найти какие-либо свидетельства переноса свойств течениями. На рис.8 показаны временная автокорреляция температуры в западной части Лабрадорского моря (район lab_sea_56w) и кросс-корреляции между колебаниями температуры в данном районе и на трех выбранных южных участках. Максимальные корреляции между Лабрадорским морем, с одной стороны, районом Ньюфаундлендского бассейна (nb_e_48w) и участком

вдоль 50° з.д. (50w_44n), с другой стороны, наблюдаются на нулевом временном сдвиге. Корреляция между Лабрадорским морем и третьим районом (nb_c_52w) слабее и имеет более сложный характер, однако максимум также наблюдается при нулевом временном сдвиге. Последний район расположен на западном фланге юго-восточной части Ньюфаундлендского хребта и является наиболее удаленным от Лабрадорского моря, если следовать вдоль континентального склона. В корреляциях с временным сдвигом отсутствуют доказательства какого-либо значительного переноса свойств. Максимальная корреляция с районами Лабрадорского моря для большинства южных участков имеет место при нулевом временном сдвиге, характеристика преобладающей пространственной структуры по EOF1 как одновременного повышения или понижения температуры слоя, занятого ВЛМ, по всему району их распространения является верной. Более сложный анализ выходит за рамки предварительного исследования, поэтому в данной работе он не выполняется.

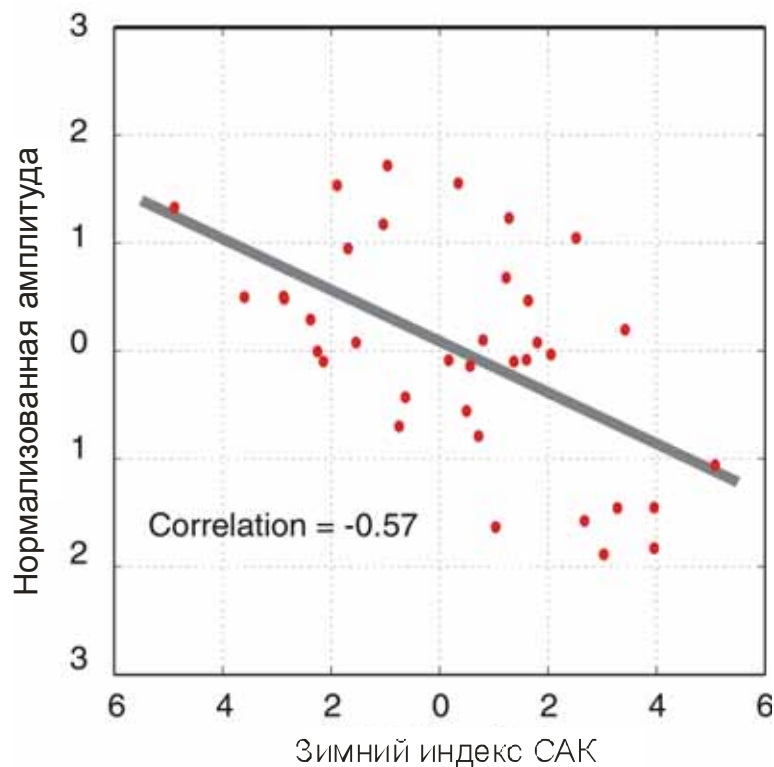


Рис.76. Диаграмма рассеяния первой температурной модели (EOF1) по отношению к зимнему индексу САК

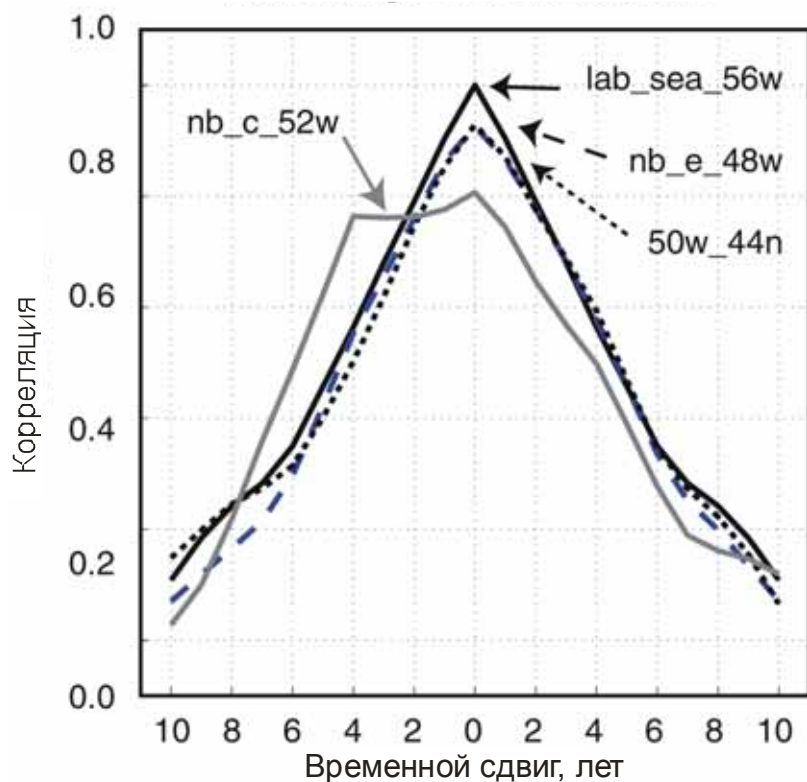


Рис.8. Временная автокорреляция температуры в западной части Лабрадорского моря (район lab_sea_56w) и корреляция с временным сдвигом между температурой в районе исследований и трех выбранных южных районах. Пояснения в тексте

Изменения толщины слоя ВЛМ

Наблюдавшаяся в последнее время тенденция к охлаждению слоя ВЛМ, прекратившаяся в 1995 г., ассоциировалась с усилением глубины конвекции и увеличением объема ВЛМ в исходном районе. Можно также сделать вывод об увеличении оттока ВЛМ из района-источника. Данные прямых измерений переноса вод, подобных выполненным с помощью серии буйковых станций, оснащенных регистраторами течений АСМ6, за многолетний период отсутствуют. Однако сравнение толщины слоя ВЛМ в наиболее теплый период с максимумом температуры в 1971 г. и в наиболее холодный с минимумом в 1994 г. показывает, что объем ВЛМ в южном районе в период между этими экстремумами увеличился. На рис.9 представлены медианные значения давления на границах слоя в средней части разреза, пересекающего Ньюфаундлендский бассейн (nb_c), за два периода: 1966-1972 гг. (70-е) и 1988-1996 гг. (90-е). Для этих специфических расчетов использовался слой сигма-0 между изопикническими поверхностями 27,72 и 27,78, в значительной мере соответствующий слою

сигма-2 ВЛМ. Толщина слоя в период между указанными промежутками времени увеличилась примерно на 35 % – с 500 дбар в 70-е до 675 дбар в 90-е годы. Изменение толщины слоя было связано главным образом с заглублением нижней границы, что наиболее ярко проявлялось в районе к западу от меридиана 46° з.д., т.е. ближе к западной границе рассматриваемого района. Подобный характер увеличения вертикальной протяженности слоя ВЛМ наблюдался по всему южному району. Предположение о том, что в 90-е годы в районе исследований объем ВЛМ увеличился, подразумевает усиление выноса вод из Лабрадорского моря в предшествующий период. Имеющиеся данные не позволяют количественно оценить изменения объема.

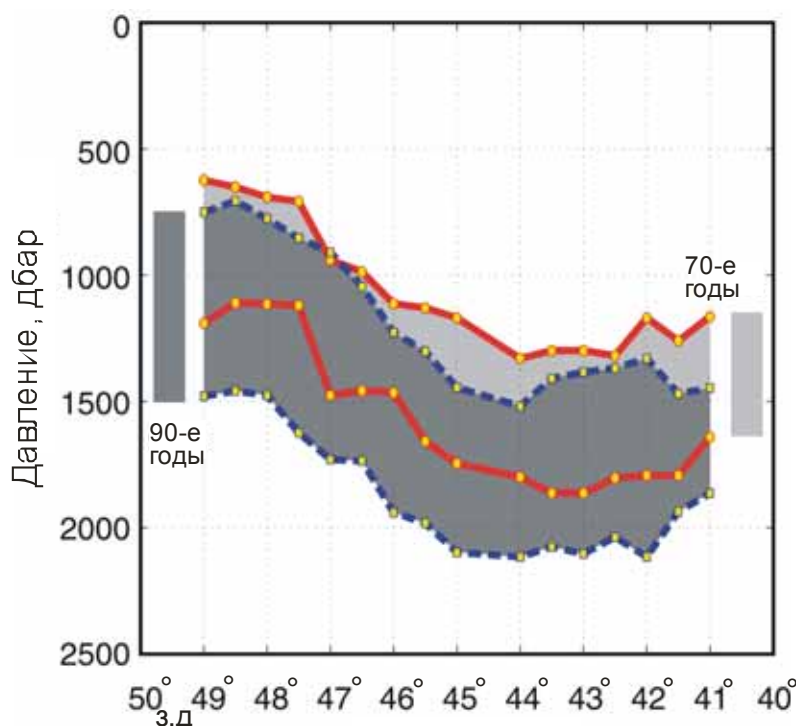


Рис.9. Слой сигма-0 между изопикническими поверхностями 27,72 и 27,78 на разрезе пв_с в центральной части Ньюфаундлендского бассейна в 1966-1972 гг., (максимум первой температурной модели EOF1) и в 1988-1995 гг. (ее минимум)

Сравнение с долгопериодными изменениями на прибрежной станции 27

Для мониторинга океанографических условий выполняется станция 27 – первая станция на стандартном разрезе от Сент-Джонса (Ньюфаундленд) до банки Флемиш Кап (рис.10а). Она расположена

примерно в 8 км от Сент-Джонса на глубине 176 м. Над континентальным шельфом в зимний период формируется холодный промежуточный слой (CIL) с температурой ниже 0 °С (Petrie, Loder, Lazier, 1992), а на станции 27 он наблюдается на протяжении всего года на глубине примерно 100 м от дна.

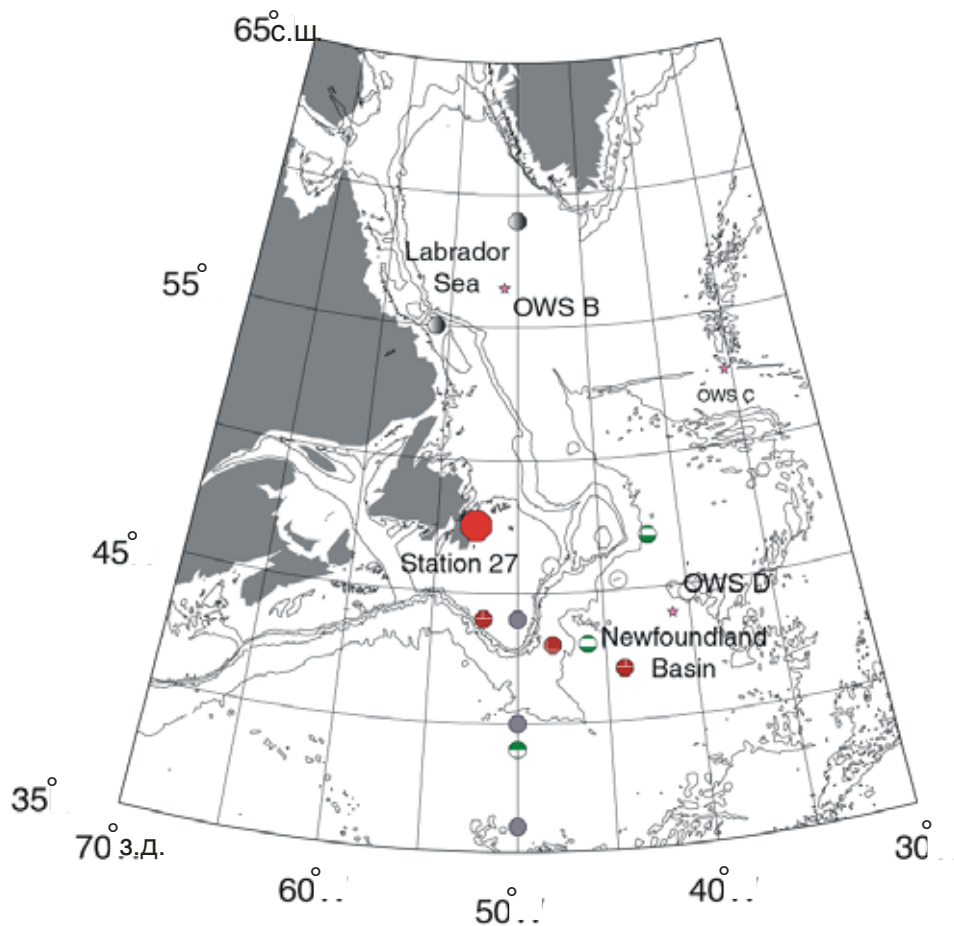


Рис.10а. Расположение станции 27 в прибрежной зоне о-ва Ньюфаундленд (47°32,8' с.ш., 52°35,2' з.д., глубина 176 м) и центры анализируемых районов

По этой станции имеются многолетние данные, поскольку наблюдения на ней являются составной частью программы мониторинга, осуществляемого океанографическими и промысловыми судами. Временной ряд температуры воды в придонном слое (175 м) за период 1960-1995 гг. сравнивался с временным рядом первой модели (EOF1) температуры ВЛМ, улавливающим крупномасштабную низкочастотную изменчивость. Выяснено, что они очень сходны (см. рис.10б). Коэффициент линейной корреляции между двумя этими рядами равен 0,78.

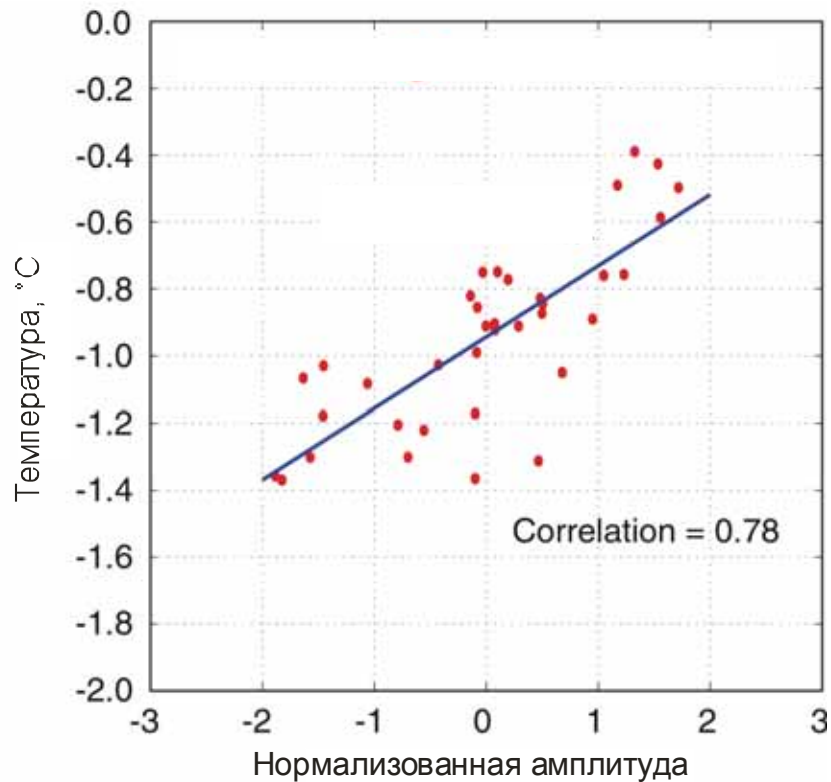


Рис.10б. Диаграмма рассеяния среднегодовой придонной (горизонт 175 м) температуры на станции 27 в 1960-1995 гг. по отношению к годовым значениям первой температурной модели (EOF1). Показана линия регрессии. Корреляция между двумя временными рядами равна 0,78. Это предполагает, что около 60 % дисперсии за проанализированный период объясняется линейной связью. Отрицательные среднегодовые значения придонной температуры на станции 27 ассоциируются с холодным промежуточным слоем на континентальном шельфе

Колебания температуры в придонном слое на станции 27, наблюдаемой и рассчитанной по регрессионной зависимости с учетом изменений EOF1, представлены на рис.10в. Эмпирическая модель улавливает низкочастотный тренд в изменениях придонной температуры на станции 27, оставляя квазидесятилетнее колебание как остаток. Холодный промежуточный слой ассоциируется с водами шельфового Лабрадорского течения, имеющими отрицательную температуру, в то время как эмпирическая мода температуры связана с крупномасштабной изменчивостью в глубоководных районах. Вероятно, хорошее согласование между долгопериодными трендами зависит скорее от общих, а не от конкретных действующих сил, чем и обусловлено наличие связи. Индекс САК является общим показателем таких сил, поскольку отражает широкий спектр процессов взаимодействия океана и атмосферы. Изменения в поступлении распресненных вод и формировании морского льда также являются возможными причинами колебаний интенсивности Лабрадорского

течения и свойств его вод. Наличие такого хорошего согласования между долгопериодными трендами крупномасштабных изменений свойств ВЛМ и вод на прибрежной станции 27 остается недостаточно изученным.

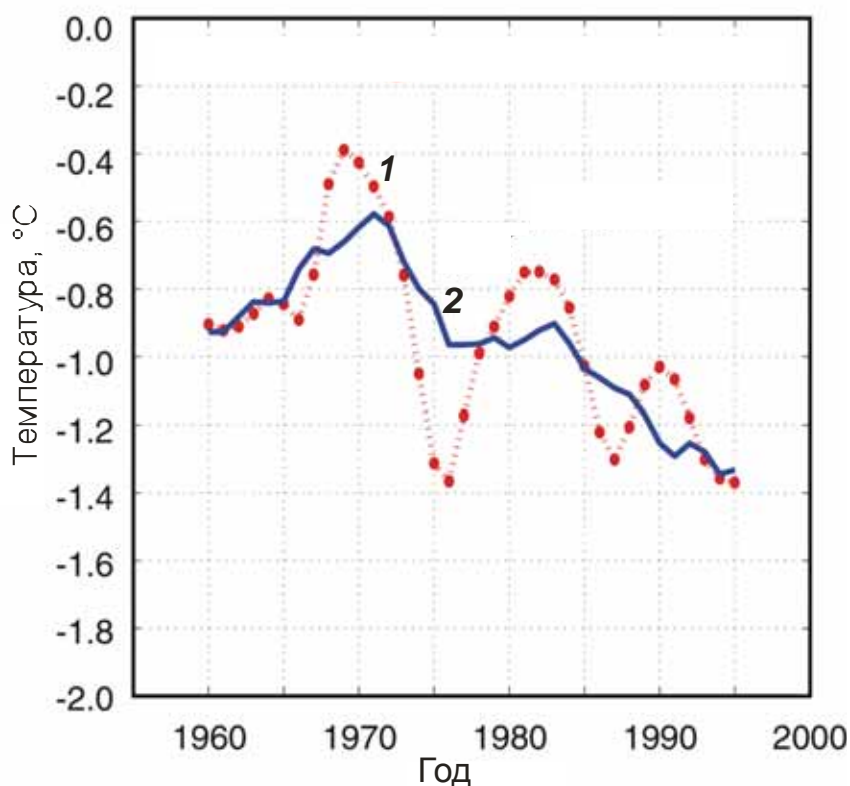


Рис.10в. Колебания среднегодовой придонной (горизонт 175 м) температуры на станции 27 в 1960-1995 гг. Показаны также изменения расчетных значений (1) этого показателя, полученных на основе регрессионной зависимости (2), учитывающей вариации первой эмпирической температурной модели. Долговременные тренды хорошо согласуются, но это еще не свидетельствует о причинно-следственной связи

Выводы

Мы провели анализ колебаний температуры и солёности в плотностном слое, ассоциирующемся с водной массой Лабрадорского моря. Выяснено, что изменения свойств этого слоя на обширной акватории северо-западной части Северной Атлантики тесно взаимосвязаны и коррелируют с колебаниями индекса зимней атмосферной циркуляции САК. Выявлено также, что эти изменения происходили одновременно на протяжении 36-летнего анализируемого периода.