

УДК 551.583

**ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ СВЯЗИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В МОСКВЕ С
ДОЛГОПЕРИОДНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ
МИРОВОГО ОКЕАНА**

Б.Г.Шерстюков

Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации-Мировой центр данных.

Россия, 249035 г.Обнинск Калужской обл. ул.Королева 6, mail: boris@meteo.ru

Реферат

Обнаружена корреляция между колебаниями температуры поверхности океана в области течения Западных ветров и колебаниями среднегодовой температуры воздуха в Москве с запаздыванием на 30 лет. На основе асинхронного регрессионного соотношения вычислены прогностические оценки колебаний температуры в Москве до 2046 года.

Ключевые слова: температура в Москве, температура поверхности океана, прогноз изменений климата

**PROGNOSTIC RELATIONS OF AIR TEMPERATURE IN MOSCOW WITH LONG-
PERIOD FLUCTUATIONS OF THE SURFACE TEMPERATURE OF THE WORLD
OCEAN**

B.G.Sherstyukov

All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information-World Data Center.

6, Koroleva st., 6249035 Obninsk, Kaluga region, Russia; mail: boris@meteo.ru

Abstract

A correlation was found between fluctuations in ocean surface temperature in the region of the flow of the Western winds and fluctuations in average annual air temperature in Moscow with a delay of 30 years. Based on the asynchronous regression ratio, prognostic estimates of temperature fluctuations in Moscow until 2046 are calculated.

Keywords: temperature in Moscow, ocean surface temperature, climate change forecast

ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ СВЯЗИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В МОСКВЕ С ДОЛГОПЕРИОДНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МИРОВОГО ОКЕАНА

Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации-Мировой центр данных.

Россия, 249035 г.Обнинск Калужской обл. ул.Королева 6, mail: boris@meteo.ru

Б.Г.Шерстюков

Введение

Огромная теплоемкость слоя взаимодействия океана с атмосферой всегда определяет доминирование океана над атмосферой в их взаимодействии. Исключение возможно только в тонком верхнем слое океана, на который могут проникать короткопериодные колебания термодинамического режима приповерхностной атмосферы.

По данным [6] за 1961-2003 годы произошло увеличение теплосодержания климатической системы на $15.9 \cdot 10^{22}$ джоулей. Из них увеличение теплосодержания океана произошло на $14.2 \cdot 10^{22}$ джоулей, атмосферы - на $0.5 \cdot 10^{22}$ джоулей, суши - на $0.76 \cdot 10^{22}$ джоулей, льда - на $0.45 \cdot 10^{22}$ джоулей. Из общего увеличения теплосодержания 89.3% пришлось на океан и только 10.7% - на все остальное (лед+суша+атмосфера). Увеличение теплосодержания атмосферы составило 3.1% от общего увеличения теплосодержания всей климатической системы. Это означает, что в годы глобального потепления около 90% дополнительного тепла пошло на нагрев океанов, и только около 3% - на нагрев атмосферы. Эти 3% избыточного тепла привели к прямому нагреву атмосферы. Но тепло получаемое мировым океаном не остается в нем навсегда, оно с некоторым запаздыванием передается в атмосферу, создавая отложенное потепление атмосферы. Поэтому можно ожидать, что сведения о термическом состоянии океана недалекого прошлого могут в некоторой мере объяснить состояние современного климата и послужить предикторами для оценок будущего состояния климата атмосферы.

На первом этапе исследования ставилась задача определения района в Мировом океане, температура поверхности которого влияет на температурный фон в Центральном регионе России. На втором этапе стояла задача прогноза изменений климата в Центральном регионе на основе асинхронной регрессии.

Существует глобальная система океанической циркуляции, которая перераспределяет тепло по всему миру. Теория большого океанического конвейера утверждает, что региональные океанические течения объединены в одну общую систему [5]. Еще в 1970 году в работе [3] было отмечено, что перераспределение тепла на Земле

морскими течениями составляет один из основных климатообразующих факторов на Земле. Позднее эти сведения получили новые подтверждения и развитие [1, 5].

Большой конвейер океанических течений медленно переносит тепло и влагу из одних регионов и слоев в океане в другие по сложным, не совсем понятным траекториям. Как отмечает Лозье [7], к настоящему времени сложилось понимание двумерной картины большого конвейера, но не трёхмерной. Неясно, связаны ли изменения течений с изменениями климата и, наоборот, связаны ли изменения климата с изменениями течений в мировом океане. Известно [1,2,5], что термохалинная циркуляция является глобальным явлением, распространяющимся на Индийский и Тихий океаны. Допускается существование колебаний климата, связанных с ослаблением и усилением термохалинной циркуляции с периодами от нескольких лет до порядка 1000 лет [4].

Анализируя асинхронную ковариационную структуру климатических индексов, в работе [10] описывается распространение сигнала изменения температуры по всему северному полушарию через последовательность многократных превращений асинхронных атмосферно-океанических дальних связей. По оценкам тех же авторов, первоначальный сигнал изменения температуры в Северной Атлантике, распространяясь, достигает удаленных регионов полушария примерно 30 лет спустя. Тридцатилетнее запаздывание может послужить хорошей основой для прогностических оценок изменения климата на 30 лет.

Исходные данные

В работе использовались данные наблюдений за температурой воздуха на метеорологической станции Москва за 1879-2016гг и данные о температуре поверхности океана в узлах географической сетки 2° на 2° широты и долготы за 1854-2016гг [8,9,11].

Массив данных о температуре поверхности океана ERSST v3b представляет собой восстановленные ряды месячных аномалий ТПО относительно норм за 1971-2000 годы. Восстановление пропущенных данных статистическими методами выполнено авторами массива. В отличие от версии ERSST v3, новая версия ERSST v3b не включает спутниковые данные, которые, как было установлено, вызывают слишком сильное смещение. Данные температуры поверхности океана в узлах севернее 80°сш получены были авторами по фрагментарным сведениям и поэтому нами не использовались как ненадежные.

Методы анализа и результаты

За многолетнюю историю метеорологических наблюдений в Москве в изменениях среднегодовых значений температуры воздуха можно обнаружить составляющие колебаний климата с разными периодами от нескольких лет до нескольких десятилетий, которые накладываются на медленный тренд потепления. Межгодовые колебания длительностью мене 3-х лет исключаем методом скользящих средних по 3-м годам. Аналогичную обработку проделываем с рядами среднегодовой температуры поверхности в каждом узле Мирового океана. По каждому слаженному ряду температуры воздуха и температуры поверхности океана получили уравнения линейных трендов. Из сглаженных значений температуры воздуха в Москве исключили линейный тренд потепления, вычисленный по всему ряду наблюдений в Москве (уравнение этого тренда будет повторно использовано при прогнозе трендовой составляющей на 30 лет). Аналогично из сглаженных значений температуры поверхности океана исключили линейные тренды потепления, вычисленные по каждому всему ряду данных по океану. Полученные отклонения от трендов содержат многолетние колебания, которые предстоит исследовать и экстраполировать на будущее. Для простоты дальнейшего изложения отклонения температуры поверхности океана от тренда обозначим просто ТПО, а отклонения температуры воздуха в Москве обозначим просто T_v .

Будем искать район в Мировом океане с максимальным положительным коэффициентам корреляции между ТПО в узле географической сетки и T_v в Москве. Учитывая возможное запаздывание распространения возмущений ТПО, о котором было сказано ранее и величина которого заведомо не известна для каждого узла, будем исследовать асинхронные корреляции ТПО с T_v в Москве со сдвигами от 0 до 36 лет (изменения ТПО опережают последующие изменения T_v).

В каждом исследуемом узле из серии асинхронных коэффициентов корреляции T_v с ТПО выделялся максимальный положительный коэффициент корреляции R и фиксировалась величина L опережения колебаний ТПО в узле относительно последующих колебаний T_v в Москве. Значимыми принимались коэффициенты корреляции $R \geq 0.3$ (вероятность случайности менее 1%). Узлы с $R < 0.3$ исключались из дальнейшего анализа.

На карту рисунка 1 в соответствующий географический узел наносилась величина R , а на карту рисунка 2 наносилась величина L опережения колебаний ТПО в узле относительно последующих колебаний T_v в Москве.

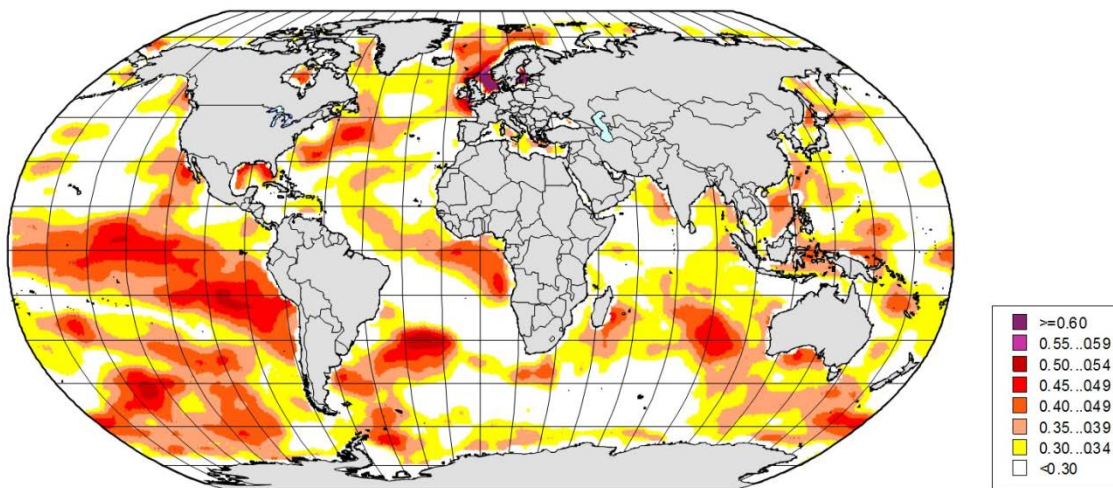


Рисунок 1. Наилучшие синхронные и асинхронные (сдвиги в пределах от 0 до 36 лет) коэффициенты корреляции колебаний ТПО в узлах географической сетки с колебаниями T_B в Москве. Изменения ТПО опережают изменения T_B

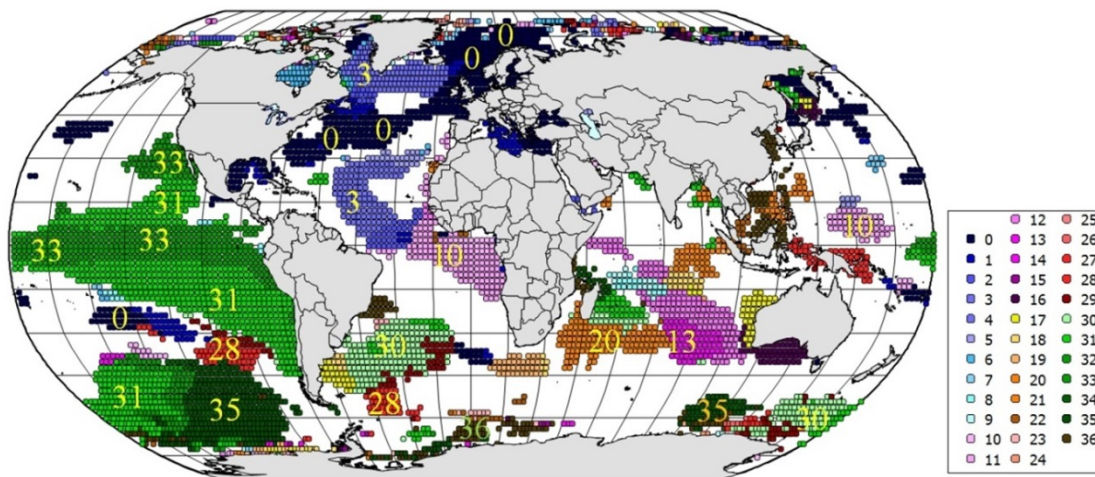


Рисунок 2. Количество лет, на которые колебания ТПО в узлах географической сетки опережают колебания T_B в Москве

Наилучшей оказалась синхронная связь ($R=0.774$) колебаний T_B с ТПО в Северном море в узле с координатами 18.0° вд 60.0° сш. А наилучшая асинхронная связь ($R=0.55$) T_B в Москве с ТПО обнаружилась в узле с координатами 18° зд 30° юш в Южной Атлантике при опережении ТПО на 30 лет ($L=30$). Кроме этого, тесная корреляция T_B с ТПО ($R>0.5$) с опережением ТПО преимущественно на 31-35 лет обнаружилась в Тихом океане на широтах $30\div 65^\circ$ юш на траектории океанического течения Западных ветров, а также вдоль Перуанского течения в направлении на север и далее с поворотом на запад вдоль экватора в Тихом океане в районе, в котором обычно бывают Эль-Нинье и Ла-Нинье. На карте рис.2 по местам перечисленных районов цифрами (31–35) указаны величины опережения (количество лет) изменений ТПО последующих изменений T_B в Москве

(долгопериодные колебания T_v в Москве запаздывают относительно подобных колебаний ТПО).

Столь же тесная асинхронная корреляция T_v обнаружена с ТПО (опережение 30 лет) в южной Атлантике – в районах Бразильского и Южного Пассатного течений и еще в Индийском океане чуть севернее Течения Западных ветров.

Во всех упомянутых океанах наилучшая корреляция ТПО с T_v наблюдается в связи с течением Западных ветров. Течение Западных ветров является самым протяженным и самым мощным течением на Земле. Это течение в Южном полушарии, приблизительно между 40 и 55° ю.ш. опоясывает Антарктику с запада на восток, пересекая Атлантический, Индийский и Тихий океаны, в которых от него ответвляются холодные Бенгельское, Западно-Австралийское и Перуанское течения. Широтная зона расположения течения Западных ветров является единственной зоной на Земле, в которой материи не преграждают путь океаническому течению при движении вокруг Земли. Эти широты известны своими непрекращающимися штормами. Относительно узкие места в океане между Антарктидой и южными оконечностями континентов Южная Америка и Австралия и подводные поднятия дна в этих местах способствуют ускорению течений, завихрениям и глубокому интенсивному перемешиванию вод океана в этих районах. Течение вызывает подъем очень холодных глубинных вод на поверхность океана, где они прогреваются, но затем они снова уходят на глубины. Перемешивание приводит к усиленному теплообмену между океаном и атмосферой.

Течение Западных ветров является важным элементом глобальной океанической циркуляции. Запаздывание 30 лет в передаче возмущений ТПО из Южного полушария Земли в атмосферу Северного полушария допустимо, так как согласуется с оценками [10]. Можно предположить, что температурные возмущения ТПО через механизм глобального конвейера океанических течений передаются с запаздыванием до 30-35 лет из области Течения Западных ветров в Северную Атлантику и затем оказывают влияние на T_v в Москве.

Сравнивая величины опережения колебаний ТПО в разных узлах по рисунку 2 постараемся проследить пути передачи возмущений ТПО из Южного полушария в Северное и в колебания T_v в Центральном регионе России.

Раньше всего возмущения ТПО возникают в Южном полушарии в районе Антарктического циркумполярного Течения Западных ветров в Тихом, Атлантическом и Индийском океанах за 30-36 лет до появления подобных изменений в T_v в Москве. За 31-33 года возмущения ТПО возникают в экваториальных широтах в Тихом океане в

районах пассатных течений и в примыкающих районах Перуанского и Калифорнийского течений.

В южной Атлантике на рис. 2 виден большой район с 30-летним опережением колебаний. А в экваториальной области Атлантики колебания ТПО происходят позднее с опережением колебаний T_b в Москве только на 10 лет. Здесь различие в 20 лет во времени появления возмущений, видимо, является временем, необходимым для перемещения возмущения температуры в океане от 30-45°юш до экваториальной Атлантики.

Севернее экватора, повторяя изгиб Серединно-Атлантического хребта, вдоль его восточного склона тянется область до широты 30°сш, в которой колебания ТПО только на 3 года опережают колебания T_b в Москве. А вдоль течения Гольфстрим и Северо-Атлантического течений вытянулась область с колебаниями, синхронными с колебаниями T_b в Москве. Тесная синхронная связь колебаний T_b в Европе с ТПО в Северном море объясняется близостью Северного моря к Европе и преобладающим западно-восточным переносом воздушных масс.

Перемещение возмущений ТПО из Южного океана в Северную Атлантику во многом совпадает с известными представлениями о глобальном конвейере течений с его поверхностными и глубинными течениями. По данным о поверхностной температуре удастся проследить только те фрагменты глобальных течений, которые проявляются на поверхности. Глубинные процессы остаются скрытыми. Общая направленность траектории перемещения возмущений температуры океана стала понятна, но непрерывного перемещения возмущений по поверхности проследить не удалось, так как поверхностная температура не дает полной информации, а трехмерная картина глобального конвейера океанических течений не вполне ясна. Без этого нельзя с полной уверенностью утверждать, что долгопериодные колебания температуры в Москве являются следствием работы глобального конвейера океанических течений.

В Индийском океане, ответвление от течения Западных ветров создают возмущения в ТПО с районами опережения колебаний Московской T_b на 20, 13 и 7 лет. А в районе океана, прилегающим к Австралии с юга, обнаружился район с колебаниями ТПО синхронными с колебаниями T_b в Москве. Видимо, время распространения возмущения ТПО по двум описанным траекториям от течения Западных ветров (в Атлантике и в Индийском океанах) совпало случайно.

Известно [1,2,5], что термохалинная циркуляция, приводимая в движение североатлантическими глубинными водами, является глобальным явлением, распространяющимся на Индийский и Тихий океаны. Допускается существование

колебаний климата, связанных с ослаблением и усилением термохалинной циркуляции с периодами от нескольких лет до порядка 1000 лет [4].

Для прогностических целей наибольший интерес представляют асинхронные связи T_v с ТПО в узле $18^\circ\text{зд } 30^\circ\text{юш}$. Судя по корреляциям, изменения ТПО в этом узле Южного полушария можно считать ранним предвестником изменений ТПО в Северной Атлантике.

С учетом выявленного ранее наилучшего сдвига было построено уравнение регрессии T_v в Москве на ТПО в упомянутом базовом узле $18^\circ\text{зд } 30^\circ\text{юш}$ при $L=30$ лет. Среднеквадратическая ошибка уравнения регрессии оказалась 0.5°C . Запоздывание колебаний T_v относительно колебаний ТПО и сдвиг ряда ТПО на 30 лет вперед позволили продлить предиктор на 30 лет до 2046 года. По уравнению регрессии и по известным значениям ТПО со сдвигом на будущее, были вычислены на 30 лет прогностические значения T_v (отклонения температуры воздуха от тренда), а затем к этим прогностическим T_v были прибавлены трендовые прогностические значения температуры воздуха до 2046 года. Для расчета прогностических трендовых значений использовалось уравнение тренда температуры воздуха, полученное ранее по всему ряду температуры в Москве. Полученные значения прогностической температуры на 2017-2046 годы приведены на рис.3. Там же показана сглаженная фактическая температура воздуха в Москве за 1879-2016 годы и сглаженная температура поверхности океана в узле $18^\circ\text{зд } 30^\circ\text{юш}$ со сдвигом на 30 лет на оси за 1879-2046 годы.

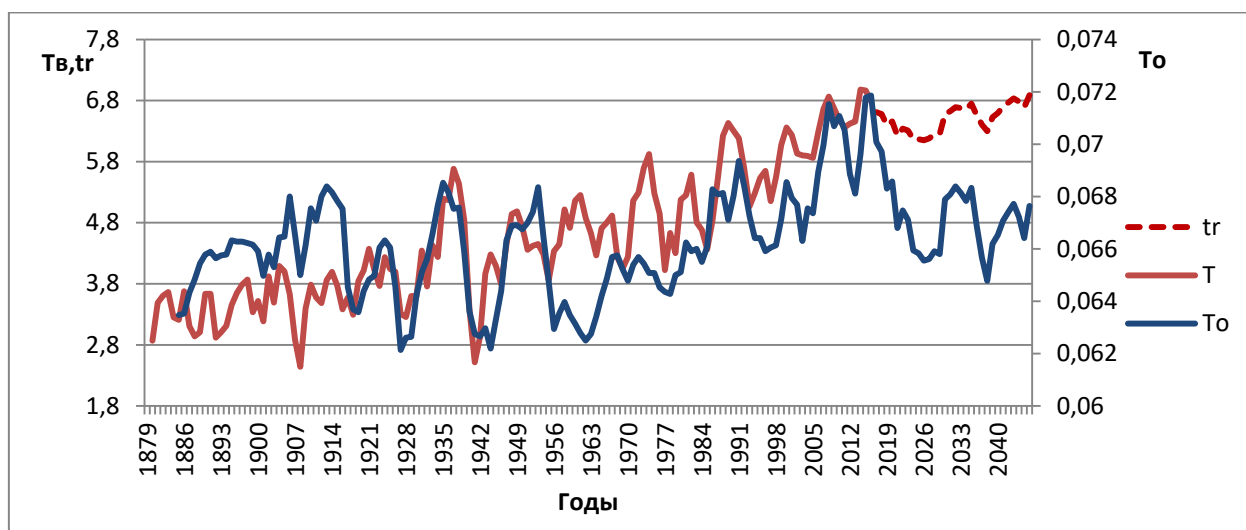


Рисунок 3. Среднегодовая сглаженная температура воздуха в Москве T по данным наблюдений за 1879-2016 годы; прогнозируемая сглаженная температура в Москве tr на период до 2046 года, вычисленная по уравнению регрессии; сглаженная температура

поверхности океана T_o в выбранном узле географической сетки океана со сдвигом на 30 лет

Из рис.3 видно, что изменение среднегодовой температуры воздуха в Москве за последнее столетие составило около 3°C . В предстоящие три десятилетия в значениях предиктора ожидается понижение, но температура воздуха в предстоящие годы удержится на современном уровне за счет добавления трендовой составляющей.

Дискуссия

Выполненный в настоящей работе анализ корреляций показал наличие некоторого скрытого механизма передачи долгопериодных возмущений ТПО, зарождающихся в области течения Западных ветров в Южном полушарии Земли и распространяющихся на север в область Северо-Атлантического течения с запаздыванием около 30 лет. Основу этого механизма предположительно составляет так называемый глобальный конвейер океанических течений.

Остается не ясно, какова причина зарождения наблюдаемых долгопериодных возмущений ТПО в Южном океане на траектории циркумполярного течения Западных ветров и является ли подобие асинхронных колебаний ТПО в Южном океане и в Северной Атлантике результатом скрытой в глубинах океана передачи возмущений из одного океана в другой через океанический конвейер течений или работает другой механизм.

Выявленное статистически запаздывание колебаний температуры в Москве позволило построить асинхронное уравнение регрессии с возможностью вычисления долгопериодных прогностических колебаний температуры в Москве на предстоящие десятилетия. Расчеты показали, что в ближайшие десятилетия произойдет стабилизация климата в Центральном регионе России.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты 18-05-00721 и 18-45-160006

Список литературы

1. Лаппо С. С. К вопросу о причинах адвекции тепла на север через экватор в Атлантическом океане //Исслед. процессов взаимодействия океана и атмосферы. М. 1984. С.125-129
2. Лаппо С.С., Добролюбов С.А., Лозовацкий, И.Д., Морозов Е.Г., Соков А.В., Шаповалов С.М. Трансформация вод антарктического происхождения и меридиональный перенос в Атлантике к северу от экватора по данным квазизонального разреза 2000 г. // В кн. Фундаментальные исследования океанов и морей. Т. 1. М.: Наука, 2006. С. 15–32.
3. Максимов И.В., Э.И.Саруханян, Смирнов Н.П. Океан и космос. Гидрометеиздат, Л., 1970, 214с.
4. Birchfield, G. E., H. X. Wang, and J. J. Rich. Century/millennium internal climate oscillations in an ocean-atmosphere-continental ice sheet model// Journal of Geophysical Res. Volume 99, Issue C6, 1994, Pp. 12459-12470. <https://doi.org/10.1029/94JC00523>
5. Broecker, W.S., The great ocean conveyor. Oceanography, 1991, 4(2), Pp. 79-89.
6. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
7. Lozier Susan. Deconstructing the Conveyor Belt // Science. 2010. V. 328. P. 1507–1511
8. Smith, T.M., R.W. Reynolds, T.C. Peterson, and J. Lawrimore, 2008: Improvements NOAA's Historical Merged Land–Ocean Temp Analysis (1880–2006), Journal of Climate, 21, pp.2283–2296.
9. The Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) dataset is a global monthly sea surface temperature analysis derived from the International Comprehensive Ocean–Atmosphere Dataset. <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/marineocean-data/extended-reconstructed-sea-surface-temperature-ersst-v3b>
10. Wyatt M.G., Kravtsov S., Tsonis A.A. Atlantic Multidecadal Oscillation and Northern Hemisphere's climate variability.// Climate Dynamics. March 2012, Volume 38, Issue 5–6, pp 929–949.
11. Xue, Y., T.M. Smith, and R.W. Reynolds, 2003: Interdecadal Changes of 30-Yr SST Normals during 1871–2000. Journal of Climate, 16, pp.1601–1612.

Spisok ssylok

1. Lappo S. S. O prichinakh perenosa tepla na sever cherez ekvator v Atlanticheskom okeane // Issledovaniya. protsessy vzaimodeystviya okean-atmosfera. M. 1984. Str. 125-129
2. Lappo S., Dobrolyubov S., Lozovatskiy I.D., Morozov Ye.G., Sokov A.V., Shapovalov S.M. Transformatsiya antarkticheskogo proiskhozhdeniya vod i atlanticheskogo regiona severa ekvatora po dannym kvazo- zona 2000. Fundamental'nyye issledovaniya okeanov i morey. T.1. M.: Nauka, 2006. S. 15-32.
3. Maksimov I. V., Sarukhanyan Ye. I., Smirnov N. P. Okean i kosmos. Gidrometeoizdat, Leningrad, 1970, 214s.
4. Birchfield, G. E., H. X. Wang, and J. J. Rich. Century/millennium internal climate oscillations in an ocean-atmosphere-continental ice sheet model// Journal of Geophysical Res. Volume 99, Issue C6, 1994, Pp. 12459-12470. <https://doi.org/10.1029/94JC00523>
5. Broecker, W.S., The great ocean conveyor. Oceanography, 1991, 4(2), Pp. 79-89.
6. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
7. Lozier Susan. Deconstructing the Conveyor Belt // Science. 2010. V. 328. P. 1507–1511
8. Smith, T.M., R.W. Reynolds, T.C. Peterson, and J. Lawrimore, 2008: Improvements NOAA's Historical Merged Land–Ocean Temp Analysis (1880–2006), Journal of Climate, 21, pp.2283–2296.
9. The Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) dataset is a global monthly sea surface temperature analysis derived from the International Comprehensive Ocean–Atmosphere Dataset. <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/marineocean-data/extended-reconstructed-sea-surface-temperature-ersst-v3b>
10. Wyatt M.G., Kravtsov S., Tsonis A.A. Atlantic Multidecadal Oscillation and Northern Hemisphere's climate variability.// Climate Dynamics. March 2012, Volume 38, Issue 5–6, pp 929–949.
11. Xue, Y., T.M. Smith, and R.W. Reynolds, 2003: Interdecadal Changes of 30-Yr SST Normals during 1871–2000. Journal of Climate, 16, pp.1601–1612.