

УДК 551.465

ДИРИЖЕРЫ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

© 2019 г. Н. В. Вакуленко, Д. М. Сонечкин*

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

**e-mail: dsonech@ocean.ru*

Поступила в редакцию 19.01.2018 г.

После доработки 04.10.2018 г.

Принята к публикации 18.06.2019 г.

Считается, что изменения теплосодержания Северной Атлантики могут быть источником сюрпризов в эволюции климата, особенно климата Европы. Для исследования этой проблемы служит программа RAPID, предусматривающая мониторинг этого теплосодержания. Однако результаты такого мониторинга охватывают еще слишком короткий интервал времени, чтобы прийти к каким-либо определенным выводам. В связи с этим с помощью вейвлетов анализируются изменения средней температуры водной поверхности Северной Атлантики как косвенной характеристики теплосодержания, наблюдаемой уже достаточно долго (с середины 20-го века). Найдены три масштаба, которые определяют временную изменчивость этой характеристики: от двух до четырех, от семи до десяти и около двадцати двух лет. Предположено, что источниками колебаний первых двух из указанных масштабов являются покачивания оси вращения Земли, а источником колебаний третьего масштаба — цикл Хейла гелиомагнитной активности.

Ключевые слова: быстрые изменения климата, атлантическая меридиональная циркуляция, атлантическое многодекадное колебание

DOI: 10.31857/S0030-1574596895-902

ВВЕДЕНИЕ

В 2002 г. Национальный научный комитет США опубликовал доклад «Резкие климатические изменения: неожиданные сюрпризы». Как один из возможных источников таких сюрпризов была указана Североатлантическая меридиональная циркуляция (САМЦ), посредством которой осуществляется теплообмен между тропическими и приполярными областями Атлантического океана. Вышедший тогда же третий Доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата отметил, что большинство существующих моделей климатической системы указывают на возможное ослабление САМЦ уже в 21-м веке, и это может повлечь серьезные последствия для глобального, и особенно для европейского климата.

Для прояснения этого вопроса существовавших в то время океанографических наблюдений было недостаточно. Поэтому была организована международная Программа Быстрых Климатических Изменений (Rapid Climate Change — RAPID). Соответствующая система наблюдений начала функционировать в марте 2004 г.

Наиболее недавний обзор многочисленных зарубежных исследований, основанных на данных RAPID, в том, что касается структуры, временной изменчивости, контролирующих механизмов САМЦ и роли этой циркуляции в глобальной климатической системе, содержится в [17]. Два основных вывода этой работы состоят в том, что САМЦ не имеет систематического тренда на наблюдаемом интервале времени, но все же влияет на глобальные климатические процессы. Поэтому следует считаться с возможностью так называемой термохалинной катастрофы, т.е. кардинального изменения динамики САМЦ из-за опреснения вод Северной Атлантики, уже в ближайшие десятилетия. Об этом предупреждают некоторые совсем недавние зарубежные публикации, в которых указывается на нисходящий тренд мощности САМЦ, начиная с 2008 г. [16, 26, 27].

Обзор последних результатов моделирования САМЦ зарубежными исследователями содержится в [31]. Согласно этому обзору, в настоящее время еще нельзя сказать, оправданы ли вышеупомянутые опасения об ослаблении САМЦ

при потеплении климата. Тем более модели еще слишком несовершенны для того, чтобы проверить гипотезу о бистабильности САМЦ, которая основывается на пионерских работах Г. Стоммела [29] и У. Брокера [15].

Что касается отечественных океанологов, то, как известно, С. С. Лаппо был первым, кто указал на возможное существование так называемого глобального океанического конвейера, т. е. обмена водными массами между всеми океанами. САМЦ можно рассматривать как один из элементов этого конвейера в Северной Атлантике. В последующем исследователями из Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН тщательно изучались потоки тепла и влаги между океаном и атмосферой, относящиеся к САМЦ [2], а также проводился мониторинг переноса водных масс через 60-й градус северной широты, что также относится к САМЦ. Элементы САМЦ и гипотетически связанная с ней так называемая термохалинная катастрофа, т. е. кардинальное ослабление САМЦ из-за опреснения вод Северной Атлантики, вызываемого таянием ледникового щита Гренландии при глобальном потеплении, изучались также в Морском гидрофизическом институте АН УССР [10].

Как это не удивительно, до сих пор нет общепринятого перевода названия этой циркуляции на русский язык. Единственным исключением является работа [1], в которой приведен обзор опять-таки зарубежных исследований того, как менялась САМЦ при изменениях климата в прошлом. В этой работе, так же как в работе [9], посвященной рассмотрению возможностей термохалинной катастрофы при дальнейшем развитии современного глобального потепления климата, указывается, что динамика САМЦ и ее устойчивость существенно зависят от рассматриваемого временного масштаба. Одно дело, что САМЦ, возможно, теряла устойчивость при переходе от максимума последнего оледенения к современному интергляциалу — голоцену. Другое дело, что при нынешнем потеплении это, по видимому, невозможно. Впрочем, отметим, что палеоклиматические исследования очень ненадежны, на что указал, например, Вунш [30]. Так что потеря устойчивости проблематична даже для масштабов тысячелетий.

К сожалению, все ряды прямых оценок меридионального переноса водных масс Северной Атлантики, которые получены в результате выполнения программы RAPID, являются слишком короткими для того, чтобы на их ос-

новании делать какие-либо выводы о динамике САМЦ, в частности о замедлении этой циркуляции в 21-м веке.

В результате для исследования динамики САМЦ приходится использовать или ряды, полученные длительными интегрированиями моделей совместной циркуляции атмосферы и океана, или ряды других характеристик гидрофизического режима Северной Атлантики, которые косвенно характеризуют САМЦ и имеют достаточную длину (несколько десятилетий).

Первый подход является сейчас очень популярным у западных исследователей (см., например, совсем недавнюю публикацию [23]). При этом западные исследователи исходят из предположения, что нынешние модели достаточно хороши. Однако, в этом можно сомневаться. Например, в [8] было показано, что даже такие сравнительно простые особенности динамики климата, как вариации средней глобальной приземной температуры воздуха в междугодовых-декадных временных масштабах, воспроизводятся современными моделями (проект CMIP5) неудовлетворительно. Что же говорить о более тонких особенностях динамики климатической системы?

По нашему мнению, предпочтительным является использование второй возможности. Согласно многим опубликованным работам (см., например, [18, 20–22]), к числу косвенных характеристик САМЦ можно отнести различные индексы так называемого Североатлантического Многодекадного Колебания, а также среднюю температуру водной поверхности Северной Атлантики [19]. Действительно, вариации этих характеристик происходят синхронно друг с другом и когерентно с вариациями САМЦ на том коротком временном интервале, на котором САМЦ была оценена непосредственно по данным RAPID.

Здесь стоит отметить, что самое первое указание на существование Атлантического Многодекадного Колебания (АМК) было опубликовано в 1994 г. в журнале Nature [25] американскими авторами. Почти одновременно с этой работой один из авторов данной статьи (Сонечкин) опубликовал в другом западном журнале статью [28], в которой было продемонстрировано, что АМК фактически представляет собой глобальное явление. Еще позднее вывод этой статьи был обобщен на ряд других характеристик климата, и это колебание поставлено в контекст современного изменения климата [6].

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

Целью настоящего исследования является тщательный многомасштабный анализ динамики САМЦ в масштабах нескольких десятилетий с использованием существующих рядов данных о средней температуре водной поверхности Северной Атлантики. Такие данные содержатся, например, на сайте <http://esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>. Они были получены из глобального анализа среднемесячной температуры поверхности океана (ТПО) (см. [19]).

Объективный анализ поля ТПО мирового океана был выполнен с использованием некоторого варианта так называемой оптимальной интерполяции (ОИ). ОИ есть интерполяция нерегулярно рассеянных по пространству судовых наблюдений на узлы регулярной сетки 5×5 градусов с учетом представлений о пространственной ковариационной структуре поля ТПО. Эта ковариационная структура была предварительно получена на основе данных о судовых наблюдениях ТПО, полученных в прошлом, и в предположении, что она остается неизменной с середины 19-го века вплоть до настоящего времени.

Конечно, предположение о неизменности структуры пространственных ковариаций ТПО никак не проверялось. Однако это же можно сказать про ковариационную структуру характеристик атмосферы, которая давно и с успехом используется для объективного анализа при численном прогнозе погоды. Здесь, правда, можно сослаться на работу [7], в которой было показано, что естественные ортогональные составляющие (основная характеристика поля пространственных ковариаций) полей приземной температуры воздуха Северной Евразии в течение 20-го века не менялись. Более того, принцип неизменности пространственной структуры лежит в основе всех современных палеоклиматических исследований.

Использованный в данной работе объективный анализ ТПО существует, вообще говоря, с 1856 г., но в особо выверенном варианте — с 1948 г. и до настоящего времени. Для расчета по этому анализу индекса АМК исходные данные выбирались из узлов регулярной сетки 5×5 градусов, покрывающих Северную Атлантику от нулевой до семидесятой северной широты. Затем производилось их скользящее осреднение для исключения годового хода и из полученных рядов исключались линейные тренды, хотя ряды доступны и без этого исключения.

Для исследования временной динамики этих рядов в данной работе используется вейвлетное преобразование (ВП). ВП является наиболее подходящим средством, чтобы изучать колебания во временных рядах, которые одновременно являются хаотичными и интегрально нестационарными, т. е. содержат тренды в масштабах практически любых своих отрезков. Однако имеется одна особенность вейвлетного анализа, которая заставляет на практике предпочитать предварительное исключение тренда. Она проистекает из конечности любых временных рядов, полученных на основе наблюдений, и состоит в появлении искажений ВП для некоторых начальных и конечных частей рядов. Централизация и нормализация исходных рядов уменьшают эти искажения. Но если тренд ряда существенен, этого оказывается ВП недостаточно, и тренд лучше исключить.

В ряду, рассматриваемом в данной работе, с 1948 по 2014 г. тренд потепления составляет примерно 0.2 градуса. Это не сильно сказывается на картине его ВП. Тем не менее, чтобы иметь картину ВП в диапазоне вейвлетных масштабов от 2 до 32 лет, который является главным объектом исследования, совсем неискаженной краевыми эффектами, на приводимых ниже рис. 1 и 2 использован вариант ряда без тренда.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты основанного на ВП анализа динамики средней температуры водной поверхности Северной Атлантики как косвенной характеристики САМЦ показаны на рис. 1 и 2. В верхней части рис. 1 показан сам анализируемый временной ряд, построенный американскими авторами [19]. Даже на глаз в этом ряду не видно никакого отрицательного тренда, который мог бы свидетельствовать об ослаблении САМЦ, предсказываемом многими западными исследователями (см., например, [24]). Правда, в части этого ряда, покрывающей период после 2004 г., когда уже стали доступными прямые измерения САМЦ по программе RAPID, видно некоторое общее понижение. Однако ниже мы покажем, что его следует трактовать не как начало долговременного отрицательного тренда, а как нисходящую фазу некоторого колебания декадного временного масштаба.

Ниже на рис. 1 показана картина амплитуд комплексного ВП рассматриваемого ряда в диапазоне временных масштабов от двух (вверху

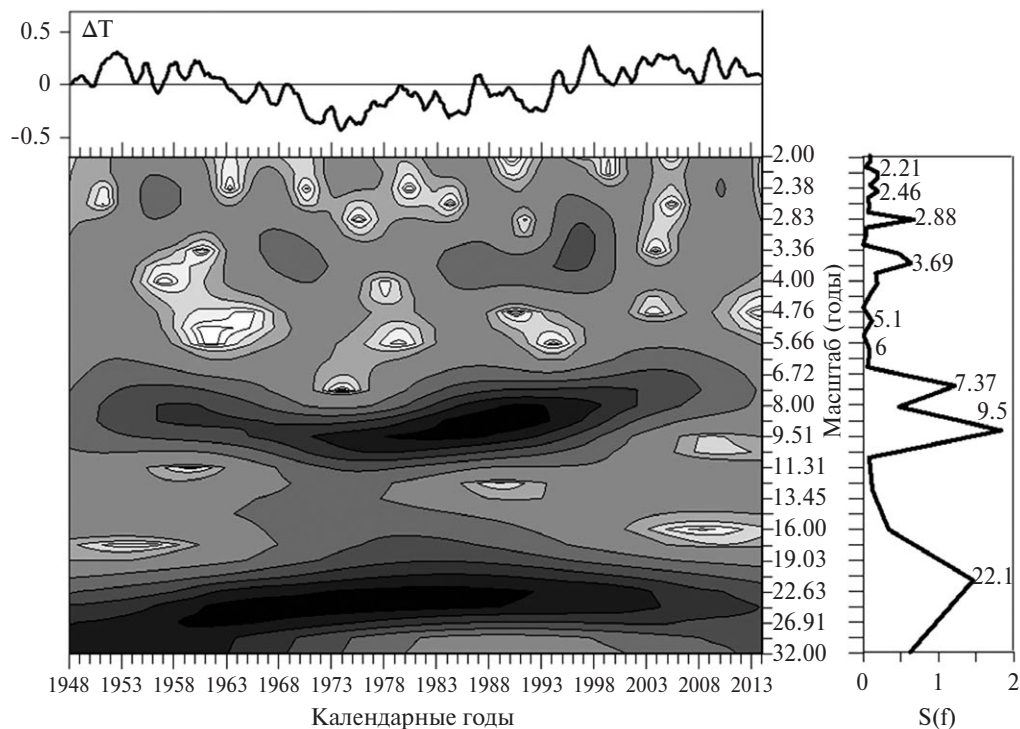


Рис. 1. Нормированный временной ряд аномалий средней температуры водной поверхности Северной Атлантики (вверху) и картина амплитуд его ВП в диапазоне масштабов от 2 до 32 лет (внизу). Чем больше амплитуда вейвлетного преобразования, тем сильнее зачернена соответствующая область на картине. Справа — энергетический спектр преобразуемого ряда. Периоды спектральных пиков указаны в годах.

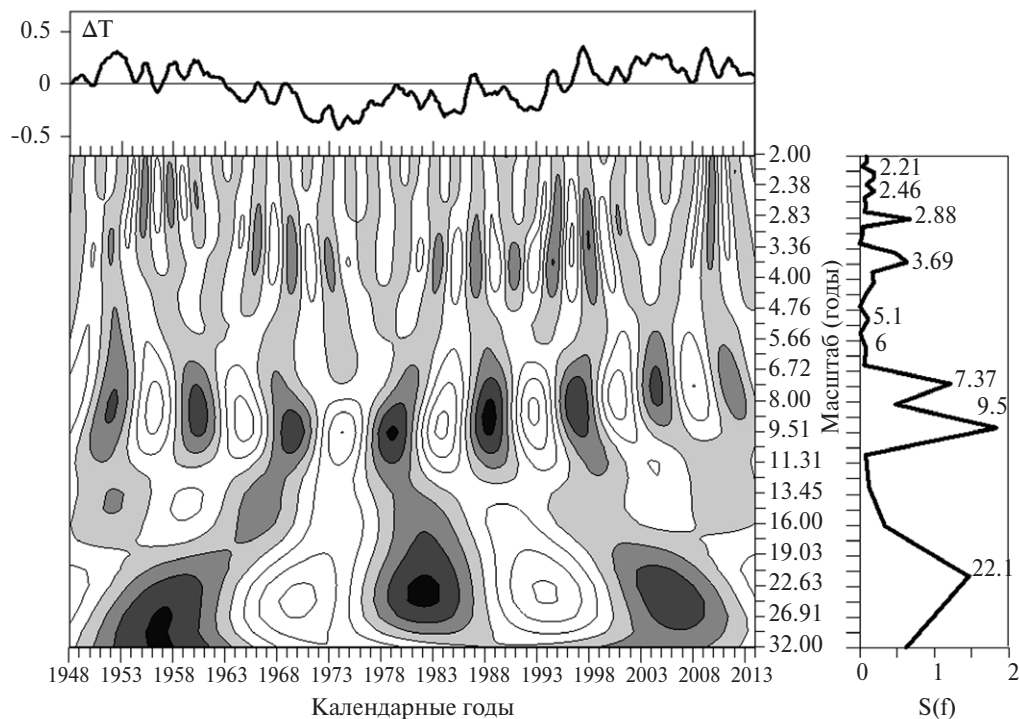


Рис. 2. Нормированный временной ряд аномалий средней температуры водной поверхности Северной Атлантики (вверху) и картина вещественной компоненты его комплексного ВП в диапазоне масштабов от 2 до 32 лет (внизу). Области, внутри которых вещественная компонента положительна, закрашены оттенками серого цвета. Области отрицательных значений оставлены белыми. Справа — энергетический спектр ряда. Периоды спектральных пиков указаны в годах.

картины) до тридцати двух (внизу) лет. Эта картина получена при использовании хорошо известной вейвлетной функции Морле.

Обращают на себя внимание две приблизительно горизонтальные полосы, внутри которых амплитуды ВП особенно велики. Первая полоса покрывает временные масштабы от примерно семи до примерно десяти лет, а вторая — от примерно двадцати до примерно тридцати лет. Важно подчеркнуть, что внутри этих полос большие амплитуды имеют место во всем диапазоне рассматриваемых календарных лет. Эти амплитуды уменьшаются на боковых краях картины ВП. Но эти уменьшения вполне можно трактовать как результаты краевых искажений при расчете ВП по конечному ряду данных. Можно заметить еще одну полосу в масштабах двух-четырёх лет, где амплитуды временами (в 1960-е и в 1980-е—1990-е г.) тоже несколько увеличены.

Справа от картины ВП на рис. 1 показан энергетический спектр рассматриваемого ряда, полученный традиционным методом быстрого преобразования Фурье. Указаны также периоды (в годах), соответствующие пикам этого спектра. Самый мощный пик приходится на период 9.5 года. Следующий по мощности пик приходится на период в 22.1 года, а третий по мощности пик — на период 7.37 года. Довольно велики также пики на периодах в 2.88 и 3.69 года.

Заметим, что три самых мощных пика приходятся на две вышеуказанные полосы больших амплитуд ВП. Вышеотмеченный факт, что внутри этих полос амплитуды более или менее равномерно велики, позволяет думать, что соответствующие этим двум полосам пики спектральной плотности не являются артефактами вычисления энергетического спектра по ряду столь небольшой длины, как 65 лет. Хотя на всей длине рассматриваемого ряда укладывается всего три колебания с периодом около 22 лет. С формальной статистической точки зрения, это должно бы указывать на случайность появления пика спектральной плотности на периоде 22.1 года.

Все три колебания отчетливо видны на рис. 2, на котором представлена картина вещественных компонент ВП этого же самого ряда средней температуры водной поверхности Северной Атлантики. Области этой картины, где вещественная компонента положительна, закрашены оттенками серого цвета. Чем

гуще цвет, тем больше величина вещественной компоненты. Области, внутри которых вещественная компонента отрицательна, оставлены белыми. Экстремумы положительных величин вещественной компоненты в полосе временных масштабов 20—30 лет приходятся на 1950-, 1970- и 2000-е гг. Соответственно, экстремумы отрицательных величин приходятся на 1960- и 1990-е гг. Видно, что все экстремумы близки друг к другу по модулю, т. е. имеет место колебание, похожее на гармоническое.

Аналогичным образом, в пределах второй полосы больших амплитуд ВП видны почти восемь колебаний со средним периодом около восьми лет. Вообще говоря, это уже близко к тому числу колебаний (десять), когда, как принято считать, колебания значимы с формальной статистической точки зрения. Дополнительную значимость рассматриваемому колебанию придает то обстоятельство, что экстремумы его положительных и отрицательных фаз более или менее одинаковы в центральной части рассматриваемого ряда (1960—1990 гг.), где краевые искажения ВП еще не сказываются.

Необходимо отметить, что второй полосе больших амплитуд ВП соответствует не один пик спектральной плотности, как это было у первой полосы, а два пика. Период одного пика равен 9.5 года, а второго пика — 7.37 года. Обе картины ВП, показанные на рис. 1 и 2, объясняют, почему в энергетическом спектре имеются два пика спектральной плотности. А именно, временной масштаб, в котором амплитуды ВП (и его вещественные компоненты) достигают экстремума, меняется со временем. В начале (около 1955 г.) этот масштаб близок к восьми годам. Затем он увеличивается до примерно девяти лет в 1975 г. А к 2005 г. снова уменьшается до примерно семи лет. Явление циклического изменения периода колебания известно как фазовая модуляция. При фазовой модуляции в энергетическом спектре рассматриваемого ряда обычно появляется несколько пиков спектральной плотности.

Обратимся сейчас к рассмотрению на рис. 1 третьей из указанных выше полос временных масштабов, внутри которых амплитуды ВП временами заметно увеличиваются. Это полоса масштабов от примерно двух до примерно четырех лет. Картина вещественных компонент ВП, показанная на рис. 2, также показывает спорадическое увеличение вещественной компоненты в 1960-е и 1980-е—1990-е гг., что свойственно амплитудной модуляции.

ОБЪЯСНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Моменты спорадических увеличений амплитуды, видимые в верхней части картины ВП ряда средней температуры водной поверхности Северной Атлантики на рис. 1, и моменты соответствующих увеличений размаха вещественной компоненты, видимые на картине ВП, показанной на рис. 2, хорошо соотносятся с известными из метеорологических наблюдений интервалами календарных лет, когда наблюдались сильные Эль-Ниньо. Поэтому вполне уместно считать, что вариации в ходе средней температуры водной поверхности Северной Атлантики в диапазоне временных масштабов от двух до четырех лет относятся к процессам Эль-Ниньо — Южного колебания (ЭНЮК). Более точно, мы можем считать их региональными проявлениями так называемой Глобальной Атмосферной Осцилляции (ГАО), которая была обнаружена в работах [4, 5]. ГАО включает в себя процессы ЭНЮК и многие другие климатические процессы, происходящие практически всюду на Земле. Пики спектральной плотности, видимые в рассматриваемом нами временном ряду на периодах 2.46, 2.88 и 3.69 лет, хорошо соответствуют пикам, существующим в энергетическом спектре ГАО (см. [12, 13]).

Причины появления пиков именно на указанных периодах объяснены в [12] как следствия неустойчивых откликов глобальной климатической системы на квазипериодическое внешнее форсирование. А именно, периоды 2.46 и 3.69 лет там объяснены как удвоения и утроения, т.е. субгармоники 2:1 и 3:1, воздействия на климатическую систему так называемого чандлеровского колебания полюсов Земли (период в примерно 1.2 года). Период 2.88 лет есть супергармоника 1:4 известного примерно одиннадцатилетнего цикла числа солнечных пятен.

Работы [12, 13] не являются первыми, в которых дано указанное истолкование происхождения квазидвух- квазитрех- и квазичетырехлетних ритмов ЭНЮК. За рубежом такое истолкование пытались делать еще в середине 20-го века. Среди отечественных ученых большое внимание такому истолкованию придавал Н. С. Сидоренков (см., например, его книгу [14]). Это истолкование до самого последнего времени встречалось с большим недоверием большинства климатологов, поскольку не было предложено никаких механизмов, которые позволили бы объяснить, как совершенно ничтожные с энергетической точки зрения чандлеровское колебание и цикл солнеч-

ной активности могут влиять на динамику междугодовых вариаций климатической системы.

Однако в недавней публикации [11] такой механизм был указан для чандлеровского колебания. Он состоит в том, что чандлеровское колебание возбуждает так называемый полюсный прилив в Тихом океане. Этот прилив распространяется в умеренных широтах обоих полушарий с запада на восток, в конце концов превращаясь в прибой у тихоокеанских побережий Северной и Южной Америки. В силу конфигурации тихоокеанского побережья Северной Америки (с северо-запада на юго-восток) прибойная волна распространяется к югу, в сторону экватора.

На определенной фазе полюсного прилива эта волна приходит к побережью Центральной Америки осенью, когда Внутритропическая Зона Конвергенции (ВТЗК) начинает смещаться из ее крайнего северного положения у берегов Калифорнии к югу. В результате, воздействие прибойной волны на поверхностные очень теплые воды вблизи Панамского перешейка складывается с воздействием пассатов, усиливающих при смещении ВТЗК.

Именно это совместное воздействие порождает теплое поверхностное течение, известное перуанским рыбакам под именем Эль-Ниньо. Данные спутниковой альтиметрии показывают, что высота водной поверхности при этом увеличивается. Это возвышение распространяется от берегов Центральной Америки вдоль экватора в сторону Индонезийского архипелага. При противоположной фазе полюсного прилива вместо возвышения появляется понижение уровня океана, которое тоже распространяется от берегов Центральной Америки в сторону Индонезии. Период чередования возвышений и понижений оказался точно равен периоду чандлеровского колебания полюсов Земли.

Что касается механизма воздействия на климатическую систему одиннадцатилетнего цикла солнечной активности, то он остается невыясненным до настоящего времени. Было предложено много различных возможностей, в основном связанных с предположением о существенном влиянии на климат самых верхних уровней атмосферы. Однако все такие работы выглядят не очень убедительными. Зато существуют математические работы (см., например, книгу [3]), которые указывают условия, при которых даже очень слабые внешние периодические воздействия могут существенно влиять на динамику нелинейной системы.

Что касается пика спектральной плотности на периоде 9.5 года, то его можно соотнести с супергармоникой 1:2 лунно-солнечной нутации оси вращения Земли (период 18.6 года). Происхождение второго пика на периоде в 7.37 года можно связать с фазовой модуляцией колебаний температуры в декадном временном масштабе. В качестве модулирующего можно предположить утроенный (субгармоника 3:1) период цикла Хейла гелиомагнитной активности (период около двадцати двух лет). Тогда более точный период второго пика должен бы составлять около 7.6 года, а полученную величину в 7.37 года надо объяснить приближенностью оценки спектра по сравнительно короткому ряду данных. Может быть, именно субгармоника 3:1 цикла гелиомагнитной активности ответственна также за Североатлантическое колебание (САК), основной период которого составляет 65 лет.

Наконец, полоса больших амплитуд и увеличенного размаха вещественной компоненты, внутри которой приходится пик спектра на периоде 22.1 года, может быть соотнесена с прямым откликом климатической системы на цикл Хейла гелиомагнитной активности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного исследования впервые был выполнен основанный на вейвлетах многомасштабный анализ междугодовых-декадных вариаций средней температуры водной поверхности Северной Атлантики как косвенной характеристики САМЦ.

Основными результатами этого анализа являются констатация отсутствия общего тренда в динамике рассматриваемой характеристики и существования трех диапазонов временных масштабов, внутри которых ее вариации особенно велики:

- 1) диапазон масштабов квазидвух-, квазитрех- и квазичетырехлетних колебаний, который может быть соотнесен с динамикой ЭНЮК и ГАО, и ответственность за возбуждение которых можно возложить на чандлеровское колебание полюсов Земли;
- 2) диапазон масштабов почти декадных колебаний, ответственность за возбуждение которых можно возложить на лунно-солнечную нутацию оси вращения Земли, воздействие которой на климатическую систему модулировано по частоте циклом Хейла гелиомагнитной активности;

- 3) диапазон масштабов двухдекадных колебаний, которые можно объяснить прямым откликом климатической системы на цикл Хейла гелиомагнитной активности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьянова Е. А., Полонский А. Б.* Резкие климатические изменения в прошлом и их связь с режимами меридиональной циркуляции в Атлантическом океане // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Т. 1. С. 20-53.
2. *Анисимов М. В., Бышев В. И., Залесный В. Б. и др.* О междекадной изменчивости климатических характеристик океана и атмосферы в регионе Северной Атлантики // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 2. С. 304-311.
3. *Блехман И. И.* Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971. 896 с.
4. *Бышев В. И., Нейман В. Г., Романов Ю. А. и др.* О статистической значимости и климатической роли глобальной атмосферной осцилляции // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 2. С. 179-185.
5. *Бышев В. И., Нейман В. Г., Романов Ю. А. и др.* Эль-Ниньо как следствие глобальной осцилляции в динамике климатической системы // *Докл. АН*. 2012. Т. 446. № 1. С. 89-94.
6. *Даценко Н. М., Монин А. С., Берестов А. А. и др.* О колебаниях глобального климата за последние 150 лет // *Докл. РАН*. 2004. Т. 339. № 2. С. 253-256.
7. *Даценко Н. М., Иващенко Н. Н., Сонечкин Д. М.* Свойства и изменения естественных ортогональных составляющих температурных полей Северной Евразии в XX веке // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47. № 1. С. 35-49.
8. *Нигматулин Р. И., Вакуленко Н. В., Сонечкин Д. М.* Глобальное потепление в реальности и в климатических моделях // *Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Труды междунар. Конф. Памяти А. М. Обухова. 13-16 мая 2013 / Ред. Голицын Г. С. и др., М.: ГЕОС, 2014. С. 255-263.*
9. *Полонский А. Б.* Глобальное потепление, крупномасштабные процессы в системе океан атмосфера, термохалинная катастрофа и их влияние на климат Атлантико-Европейского региона // *Современные проблемы океанологии*. Вып. 5. Севастополь: Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2008. 44 с.
10. *Полонский А. Б., Башарин Д. В., Воскресенская Е. Н. и др.* Североатлантическое колебание: описание, механизмы и влияние на климат Евразии // *Морской гидрофизический журнал*. 2004. № 2. С. 42-59.
11. *Серых И. В., Сонечкин Д. М.* О влиянии полюсного прилива на Эль-Ниньо // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 2. С. 44-52.
12. *Серых И. В., Сонечкин Д. М.* О проявлениях движений полюсов Земли в ритмах Эль-Ниньо — Южного Колебания // *Докл. РАН*. 2017. Т. 472. № 6. С. 716-719.
13. *Серых И. В., Сонечкин Д. М.* Сопоставление временных энергетических спектров индексов Эль-

- Ниньо — Южного Колебания и глобальных полей температуры и атмосферного давления в приповерхностном слое // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Т. 2. С. 144-155.
14. *Сидоренков Н. С.* Физика неустойчивостей вращения Земли. М.: Физматлит, 2002. 384 с.
 15. *Brocker W. S.* Does the trigger for abrupt climate change reside in the ocean or in the atmosphere? // *Science*. 2003. V. 300. P. 1519-1522.
 16. *Bryden H. L., Longworth H. R., Cunningham S. A.* Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25 N // *Nature*. 2005. V. 438 (7068). P. 655-657.
 17. *Buckley M. W., Marshall J.* Observations, inferences, and mechanisms of Atlantic Meridional Overturning Circulation variability: A review // *Rev. Geophys.* 2016. 54 (1). P. 5-63.
 18. *Cummingham S. A., Kanzow T., Rayner D. et al.* Temporal variability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation at 26.5 N // *Science*. 2007. V. 317 (5840). P. 935-938.
 19. *Enfield D. B., Mestas-Nunez A. M., Trimble P. J.* The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S. // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. № 10. P. 2077-2080.
 20. *Gray S. T., Graumlich L. J., Betancourt J. L. et al.* A tree-ring based reconstruction of the Atlantic Multidecadal Oscillation since 1567 A.D. // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L12205, doi:10.1029/2004GL019932.
 21. *Gulev S. K., Latif M., Keenlyside N. S. et al.* North Atlantic ocean control on surface heat flux at multidecadal timescales // *Nature*. 2013. V. 499. P. 464-467.
 22. *McCarthy G. D., Haigh I. D., Hirshi J. J.-M. et al.* Ocean impact on decadal Atlantic climate variability revealed by sea level observations // *Nature*. 2015. V. 521. P. 508-510.
 23. *Outten S., Esau I.* Bjerknæs compensation in the Bergen climate model // *Clim. Dyn.* 2017. V. 49. P. 2249-2260.
 24. *Rahmstorf S., Box J. E., Feulner G. et al.* Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic ocean overturning circulation // *Nat. Clim. Chang.* 2015. V. 5. P. 475-480.
 25. *Schlesinger M. E., Ramankutty N.* An oscillation in the global climate system of period 65-70 years // *Nature*. 1994. V. 367. P. 723-726.
 26. *Send U., Lankhorst M., Kanzow T.* Observation of decadal change in the Atlantic meridional overturning circulation using 10 years of continuous transport data // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L24606. doi:10.1029/2011GL049801.
 27. *Smeed D. A., Carthy G. D., Cunningham S. A. et al.* Observed decline of the Atlantic meridional overturning circulation 2004 to 2012 // *Ocean Sci.* 2014. V. 10 (1). P. 29-38.
 28. *Sonechkin D. M., Astafyeva N. M., Datsenko N. M. et al.* Multiscale Oscillations of the Global Climate System as Revealed by Wavelet Transform of Observational Data Time Series // *Theor. Appl. Climatol.* 1999. V. 64. P. 131-142.
 29. *Stommel H.* Thermohaline convection with two stable regimes of flow // *Tellus*. 1961. V. 13. № 2. P. 224-231.
 30. *Wunsch C.* Towards understanding the Paleoclean // *Quaternary Sci. Rev.* 2010. V. 29. № 7. P. 1960-1967.
 31. *Yeager S. G., Robson J. I.* Recent progress in understanding and predicting Atlantic decadal climate variability // *Curr. Clim. Change Rep.* 2017. V. 3. № 2. P. 112-127.

CONDUCTORS OF THE CURRENT VARIATIONS OF THE SEA-SURFACE TEMPERATURE OF THE NORTH ATLANTIC

© 2019 N. V. Vakulenko, D. M. Sonechkin *

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia

*e-mail: dsonech@ocean.ru

Received January 19, 2018

Revised version received October 04, 2018

After revision June 18, 2018

It is generally accepted to believe that changes in the heat content of North Atlantic can be a source of surprises in the climate evolution, especially the climate of Europe. The RAPID program providing monitoring of this heat content serves to investigate this problem. However, results of such monitoring cover still too short time period to come to any conclusion. In this regard, changes of the North Atlantic's sea surface mean temperature which already is observed during a long enough period (from the middle of the 20-th century) is analyzed as an indirect characteristic of the heat content. Wavelets are used for this purpose. Three scales, which define temporal variability of this characteristic, are found: from two to four, from seven up to ten, and about twenty two years. It is assumed that sources of variations of the first two from the specified scales are wobbles of the Earth's rotation axis, and the source of variations of the third scale is the Hale's cycle of heliomagnetic activity.

Keywords: rapid climate change, Atlantic meridional circulation, Atlantic multi-decadal oscillation