

УДК 551.465

## ДИРИЖЕРЫ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ СЛОЕВ ОКЕАНА СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

© 2020 г. Н. В. Вакуленко<sup>1</sup>, Д. М. Сонечкин<sup>1</sup>, \*<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: dsonech@ocean.ru

Поступила в редакцию 17.04.2019 г.

После доработки 08.10.2019 г.

Принята к публикации 16.12.2019 г.

Считается, что изменения теплосодержания Северной Атлантики могут быть источником сюрпризов в эволюции современного климата, особенно климата Европы. Для исследования этой проблемы служит мониторинговая программа RAPID. Однако результаты такого мониторинга охватывают еще слишком короткий интервал времени, чтобы прийти к каким-либо определенным выводам. В данной работе, с помощью вейвлетов анализируются изменения теплосодержания слоев 0–700 и 0–2000 м с середины 20-го века, их связи с изменениями средней температуры слоя 0–100 м, а также ранее проанализированными изменениями температуры водной поверхности Северной Атлантики. Найдено, что на фоне общего увеличения теплосодержания имеют место колебания всех указанных характеристик с периодом, сходным с примерно 22-летним периодом известного цикла Хейла гелиомагнитной активности. В слое 0–700 м это колебание опережает по фазе не только соответствующее колебание в слое 0–2000 м, что соответствует общепринятым представлениям об общем распространении аномалий теплосодержания океана сверху вниз, но опережает и в температуре вышележащего слоя 0–100 м, а также в температуре водной поверхности. Это позволяет думать, что изменения гелиомагнитной активности непосредственно влияют именно на этот верхний слой океана, а уже потом распространяются не только вниз, но и вверх.

**Ключевые слова:** изменения теплосодержания Северной Атлантики, солнечная активность, вейвлетный анализ

**DOI:** 10.31857/S0030157420010232

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема современного изменения климата и атрибуции его причин к естественным или антропогенным факторам находится в центре внимания ученых уже с середины XX века. Для мониторинга происходящих изменений при этом обычно используются наблюдения за приземной температурой воздуха. Это кажется естественным, ибо именно приземная температура воздуха непосредственно влияет на жизнедеятельность человека. Однако короткопериодные изменения в скорости современного потепления, например, такие как примерно 30-летнее похолодание после 1940-х гг. и 18-летняя приостановка потепления в самом конце XX и начале XXI века, трудно объяснить только на основе связи изменений приземной температуры воздуха с нарушением радиационного баланса Земли как планеты. Это — так, поскольку теплоемкость приземного двухметрового слоя атмосферы, в котором проводятся измерения этой температуры, составляет ничтожную долю процента от общей теплоемкости климатической системы. Эта температура, в основном, определяется обменами тепла двухметрового

приземного слоя воздуха с вышележащими слоями атмосферы и, в особенности, с нижележащей толщей океана, независимо от нарушений теплового баланса Земли как планеты. Конечно, климатологи давно осознали этот факт, но не могли его учитывать из-за отсутствия сколько-нибудь длинных и репрезентативных рядов наблюдений за теплосодержанием океана.

Как известно, первые эпизодические измерения температуры воды в океане были начаты во время второй экспедиции Дж. Кука в 1772–1775 гг. (см. [8]). Только через 100 лет, после английской морской экспедиции на судне Челленджер (1872–1876 гг.) измерения температуры на поверхности и в толще океанов стали проводиться более или менее регулярно.

В последнее время работы по рассмотрению теплосодержания океана как главного индикатора изменений климата существенно активизировались. При этом считается, что нагревание океана приходящей солнечной радиацией происходит с поверхности. Затем это тепло распространяется вниз, в толщу океана. Из-за огромной теплоемкости океана это распространение происходит очень

медленно, если сравнивать с тем, как перераспределяется полученное от Солнца тепло в толще атмосферы. Поэтому сегодняшнее теплосодержание глубоких слоев океана не соответствует тому, что сейчас происходит с климатом приземного слоя воздуха. Оно служит индикатором того, насколько теплым или холодным был климат в прошлом.

В совсем недавней публикации [10] были использованы реконструкции климатов последних 2000 лет и климатическая модель, чтобы показать, что, начиная с так называемой Средневековой Теплой Эпохи, высокое теплосодержание верхних слоев океана распространилось вниз и достигло наиболее глубинных частей Атлантического океана спустя 300–400 лет. В Тихом океане это произошло спустя примерно 700 лет. Затем, после Малого Ледникового Периода, уже низкое теплосодержание распространилось сверху вниз за примерно 200 и 300 лет соответственно. Пик похолодания в самых глубоких (~6000 м) слоях Атлантического океана пришелся на середину XX века. Самые глубокие слои Тихого океана сейчас все еще продолжают холодеть.

Данная работа продолжает наше исследование того, как менялась средняя температура водной поверхности Северной Атлантики (ТВПСА) [6]. Там было показано, что изменения ТВПСА в течение последних примерно шестидесяти лет, помимо общего тренда потепления, слагались, в основном, тремя почти периодическими компонентами, из которых наиболее мощной была компонента с периодом, хорошо совпадающим с известным примерно 22-летним циклом гелиомагнитной активности (циклом Хейла).

В продолжение того исследования, рассматривается, как менялось теплосодержание толщи вод Северной Атлантики за примерно тот же полувековой временной период. Обнаруживается, что изменения теплосодержания в толще Северной Атлантики также выявляют такое же колебание. При этом оно распространяется от слоя 0–700 м вниз, что подтверждает вышеупомянутое мнение. Но неожиданно оказывается, что в ТВПСА и в самом верхнем слое океана 0–100 м это колебание запаздывает по фазе от температурных колебаний в слое 0–700 м.

## 2. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД ИХ ОБРАБОТКИ

В качестве исходных в настоящей работе были использованы данные об изменениях теплосодержания слоев 0–700 и 0–2000 м Северной Атлантики (30°–65° с.ш., 0°–60° з.д.) в 1955–2016 гг. и об изменениях средней температуры слоя 0–100 м, опубликованные Национальным Центром Океанографических данных США (National Oceanographic data Center – NODC; [http://](http://www.nodc.noaa.gov/)

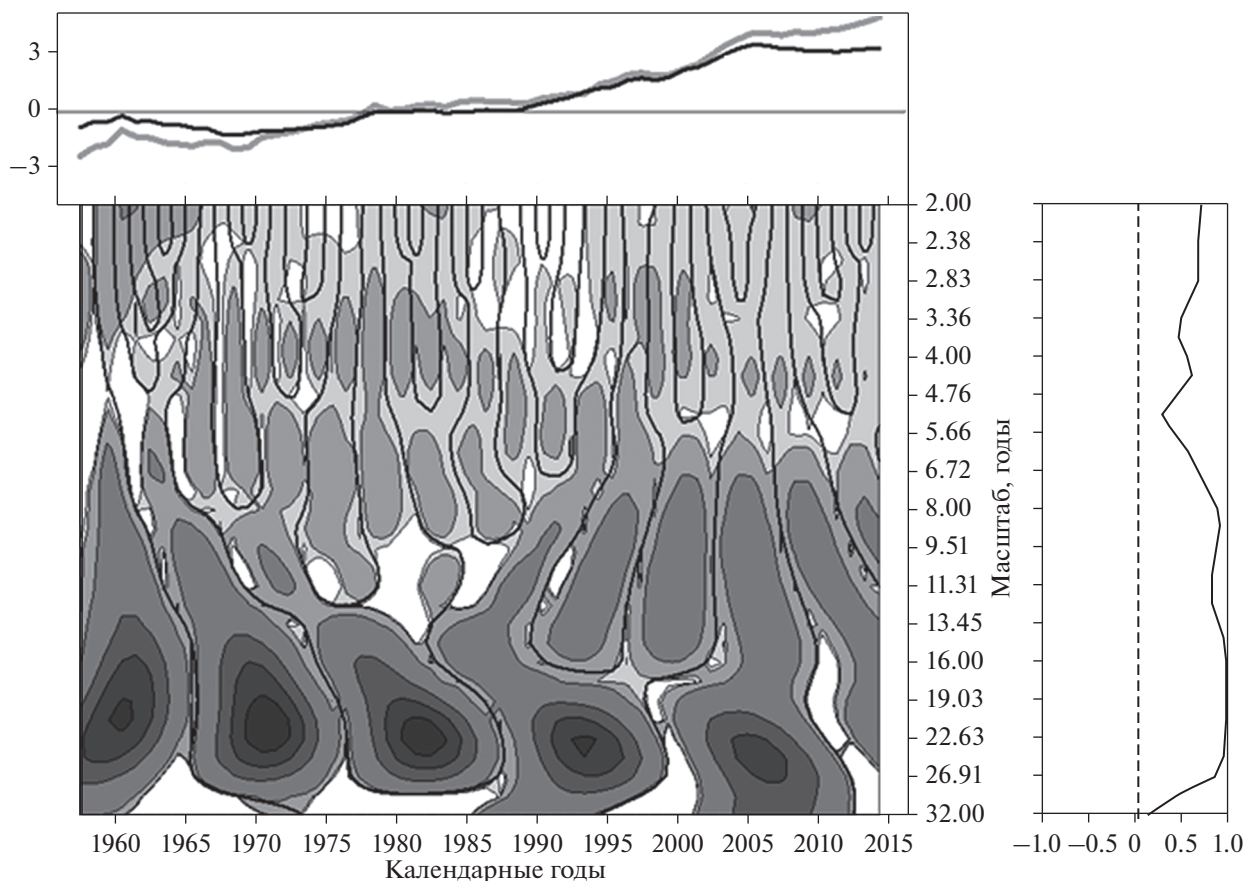
[www.nodc.noaa.gov/](http://www.nodc.noaa.gov/)). Кроме того, использовались данные о ТВПСА, уже анализировавшиеся в первой части нашей работы [6]. Надо отметить, что качество рядов, особенно ряда теплосодержания для слоя 0–2000 м, является очень низким. По времени все ряды неоднородны [8]. Для наиболее ранних из числа рассматриваемых лет (начало второй половины XX века) они основаны на очень малом числе исходных измерений температуры воды в толще океана. Однородность рядов неоднократно нарушалась при введении новых типов измерений. Так, с начала 1900-х и до 1939 гг. использовался только так называемый нансеновский термометр, который позволял оценить температуру воды только на дискретном, и небольшом, числе уровней. В 1939 г. появился механический батитермограф, дававший непрерывный вертикальный профиль температуры. С 1955 г. стали использовать профилемер и для измерений солёности морской воды. В 1984 г. в рамках программы TOGA начался непрерывный мониторинг океана в тропиках Тихого океана. В пределах рассматриваемого в данной статье интервала времени серьезное нарушение однородности произошло в 2001 г., когда начала вступать в действие система непрерывного глобального мониторинга ARGO. Это нарушение видно в обоих рядах теплосодержания, показанных на рис. 1, по ускорившемуся на несколько лет росту теплосодержания.

По всем таким причинам американские разработчики этих рядов были вынуждены отказаться от отдельной оценки теплосодержания слоя 700–2000 м. Опубликованы только ряды, относящиеся к перекрывающимся слоям 0–700 и 0–2000 м. Для слоя 0–700 м ряд имеет годичное и пентадное разрешение, а для слоя 0–2000 м – только пентадное. При пентадном разрешении (1957–2014 гг.) каждому календарному году в середине 5-летнего интервала присваивается значение теплосодержания за весь 5-летний период. Для самого верхнего слоя 0–100 м публикуются лишь данные о средней температуре этого слоя.

В настоящей работе все вышеупомянутые ряды были впервые проанализированы с использованием техники вейвлетного преобразования, чтобы выявить особенности вариаций теплосодержания разных временных масштабов и характер их вертикального распространения.

Само по себе вейвлетное преобразование (ВП) временных рядов хорошо известно. Для ряда, представленного конечной и дискретной последовательностью данных  $X(t)$ , взятых с единичным шагом по времени, это преобразование записывается как

$$WT_b(a) = a^{-1/2} \sum_{t=t_1}^{t=t_n} X(t)G((t-b)/a). \quad (1)$$



**Рис. 1.** Центрированные и нормированные ряды теплосодержания слоев 0–700 м (черная линия) и 0–2000 м (серая линия) Северной Атлантики (вверху), картина вейвлетных кросскорреляций этих рядов после исключения их линейных трендов, и средние по времени помасштабные кросскорреляции этих рядов (справа от картины).

В этой формуле  $b$  – сдвиг по времени ( $t_1 \leq b \leq t_n$ ,  $n$  – длина ряда),  $a$  – вейвлетный масштаб ( $a > 0$ ) и  $WT_b(a)$  – величина вейвлетного преобразования для масштаба  $a$  и сдвига  $b$ . Если используется вейвлетная функция Морле  $G(t) = \pi^{-1/4} \exp\{i\omega t\} \times \exp\{-t^2/2\}$ , то величина  $WT_b(a)$  является комплексной  $WT_b(a) \equiv \text{Re} WT_b(a) + \text{Im} WT_b(a)$ . Используя только последовательность вещественных компонент  $\text{Re} WT_b(a)$ , соответствующих одному и тому же вейвлетному масштабу  $a$ , при этом можно выявить почти периодические вариации преобразуемого ряда, периоды которых близки к  $a$ . Заметим, что значение  $\omega = 6.2035$  обеспечивает точное равенство вейвлетного и обычного временного масштаба. Именно это значение используется в данной работе.

В работах [1–4] для количественного сравнения вариаций разного временного масштаба и их изменений со временем была разработана специальная техника, основанная на ВП (1). Согласно этой технике, сначала вычисляется произведение

$CROSSWT_b(a) = \text{Re} WT_{1_b}(a) \text{Re} WT_{2_b}(a)$  величин ВП для двух сравниваемых рядов при всех значениях  $b$  и  $a$  из заданного диапазона. Результат этого вычисления представляется как картина кроссвейвлетного преобразования (CrossWT) на полуплоскости  $(b, a)$ , как это делается и при обычном ВП. Заметим, что с равным успехом можно использовать произведение мнимых компонент ВП. Тогда картина CrossWT просто сдвинется вправо на четверти периодов представленных колебаний.

Области полуплоскости, где произведение  $CROSSWT_b(a)$  является положительным, закрашиваются оттенками серого цвета, пропорционально величине произведения. Те области, где произведение отрицательно, оставляются белыми, независимо от величины модуля произведения. Ясно, что, если при ВП используется вейвлетная функция Морле, то первые области соответствуют синфазным вариациям в сравниваемых рядах, а вторые области – противофазным. Затем, на полученную картину CrossWT накладываются жирные линии, соответствующие нулевым значениям  $\text{Re} WT_{1_b}(a)$ . Это позволяет видеть, вариации

какого ряда опережают вариации (или следуют за вариациями) другого ряда в данном конкретном масштабе и в данное конкретное время.

Например, пусть в некотором вейвлетном масштабе в некоторый момент времени  $CROSSWT_b(a) > 0$ , а спустя некоторое время эта величина становится отрицательной. На картине CrossWT этому соответствует сначала область, закрашенная серым цветом, а затем белая область. Если линия, разделяющая эти области, является жирной, то это значит, что сначала соответствующие величины ВП ( $ReWT_{1_b}(a)$  и  $ReWT_{2_b}(a)$ ) в обоих рядах были синфазными. Например, обе они были положительными (отрицательными). Но затем величина первого ряда сменила свой знак, а величина второго ряда продолжала оставаться такой же, как и ранее. В противном случае, когда разделяющая линия была тонкой, первой сменила свой знак величина второго ряда.

Надо отметить, что существует другая техника CrossWT, которая является аналогом взаимного спектрального анализа для нестационарных временных рядов (см. [14, 15]). Согласно этой технике, сначала вычисляется свертка результатов комплексного ВП для каждого из сопоставляемых временных рядов по отдельности:  $CROSS_b(a) = WT_b^1(a)WT_b^2(a)^*$ , где звездочка означает комплексное сопряжение. Затем эта величина усредняется по времени и вейвлетному масштабу, и по полученным усредненным данным вычисляются когерентности и фазовые сдвиги между колебаниями в обоих рядах в каждый момент времени и для каждого вейвлетного масштаба.

Эта техника имеет два существенных недостатка. Во-первых, произвольным является временной и масштабный интервал усреднения исходной свертки  $CROSS_b(a)$ . При этом не доказано, что выбор иного осреднения не приводит к существенно другим результатам. Во-вторых, дизайн выходного продукта этого  $CROSSWT$  крайне неудачен: на поле когерентности накладываются “циферблаты”, стрелки которых указывают величину фазы. Эти циферблаты трудно читаемы.

Если же использовать технику CrossWT, описанную выше, то она, конечно, не дает никакой информации о помасштабной и временной когерентности, а фазы даются в качественном смысле. Это значит, что можно судить только о том, колебание рассматриваемого масштаба в рассматриваемый момент времени в первом ряду опережает или запаздывает по отношению к соответствующему колебанию во втором ряду. Но этого, как представляется авторам данной статьи, достаточно для многих геофизических приложений. Зато эта техника не требует никакого усреднения и соотношение лидирования-запаздывания наглядно представлено для каждого отдель-

ного колебания. Также такая предварительная обработка рядов, как их центрирование и нормирование, не влияет на получаемую при CrossWT информацию о синхронизации фаз разномасштабных колебаний в сравниваемых рядах.

### 3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Вверху на рис. 1 показаны предварительно центрированные и нормированные ряды тепло-содержания слоев 0–700 м (черная линия) и 0–2000 м (серая линия) для Северной Атлантики за период с 1957 по 2014 гг. Ниже показана картина кроссвейвлетного преобразования этих рядов (ряд слоя 0–700 м рассматривается первым), полученная после исключения из обоих показанных рядов их линейных трендов. Это сделано для максимально возможного уменьшения краевых искажений результатов ВП, которые, как известно, неизбежно возникают при преобразованиях рядов конечной длины. Справа от картины показан график средних по времени кросскорреляций между вещественными вейвлетными компонентами обоих рядов для всех рассматриваемых временных масштабов.

Здесь надо упомянуть, что, с точки зрения авторов настоящей работы, использование теста статистической значимости результатов ВП отдельных временных рядов, описанного в [14], и его распространение на оценку когерентности на картине CrossWT, как это сделано в [15], не является удовлетворительным. Суть в том, что этот тест предполагает, что ряды являются стационарными, стационарно связанными и формируемыми простыми процессами авторегрессии первого порядка. На самом деле, ряды, с которыми обычно имеют дело в климатологии и океанологии, не являются таковыми. Они интегрально нестационарны, т.е., глядя на отрезок ряда конечной длины, практически всегда можно видеть некоторый тренд. Затем, реальные процессы обычно принадлежат к описанным Б. Мандельбротом [12] процессам с “тяжелыми хвостами”. Временные корреляционные функции таких процессов не являются затухающими экспонентами. Они лучше аппроксимируются функциями типа  $R(\tau) \approx 1/\tau^\alpha$ ,  $\alpha \approx 1$ . Такие функции были, например, найдены для полей приземной температуры воздуха в [7]. Энергетические спектры этих процессов также резко отличны от таковых у процессов авторегрессии. Соответственно, у них должны быть вполне разные доверительные интервалы, предназначенные для использования в статистических тестах.

Еще одно соображение, которое тоже надо учитывать. Принятие гипотезы о статистической значимости некоторой особенности в энергетическом спектре или вейвлетном спектре означает,

что эта особенность будет наблюдаться и впредь. Однако у нестационарного процесса этого может и не быть. Например, 11-летний цикл солнечных пятен обычно оценивается как статистически значимый. Но этот цикл полностью отсутствовал во второй половине XVII века во время известного периода пониженной солнечной активности Маундера.

С другой стороны, если тест дал отрицательный результат, то наблюдаемая особенность считается появившейся случайно. Но динамика климатической системы атмосфера–океан является детерминированной, и у нее каждая особенность имеет свою причину. Наилучшим средством установления этой причины является не формальное статистическое тестирование, а содержательное рассмотрение физики, порождающей эту особенность.

Распознать, какая физика скрыта за наблюдаемым явлением, часто трудно. Тогда могут помочь наблюдения того же явления в других относящихся к делу гидрометеорологических рядах.

Поскольку исходные ряды теплосодержания имеют всего лишь пятилетнее временное разрешение, можно было заранее ожидать, что структура картины CrossWT в вейвлетных (временных) масштабах менее десяти лет не будет отражать реальность. И действительно, в верхней половине картины CrossWT взаимное расположение областей, закрашенных оттенками серого, где вариации теплосодержания в сравниваемых рядах являются синфазными, и областей, оставленных белыми, где они противофазны, выглядит случайным, и формы всех областей сильно различаются. Этому соответствуют вариации средних по времени кросскорреляций от 0.3 до 0.7, которые нельзя признать существенными.

Зато в вейвлетных (временных) масштабах от 8 до 25 лет средние по времени кросскорреляции очень велики (от 0.8 до почти 1.0). Рассматривая же нижнюю половину картины CrossWT, можно видеть, что столь высокие кросскорреляции обеспечиваются практической синфазностью колебаний этих масштабов в сравниваемых рядах. Эта синфазность проявляется в том, что почти вся нижняя половина картины CrossWT составлена из областей, закрашенных оттенками серого и окаймленных с боков жирными линиями. Области, оставленные белыми, занимают малую долю этой части картины CrossWT. Они видны в масштабах около 10 лет в 1970–1990 гг.

Белые области начинают встречаться на равных с серыми областями только в масштабах более 25 лет. В результате средняя по времени кросскорреляция падает там почти до нуля. Скорее всего, это не отражает реальность, а является следствием оставшихся не устраненными краевыми искажениями ВП.

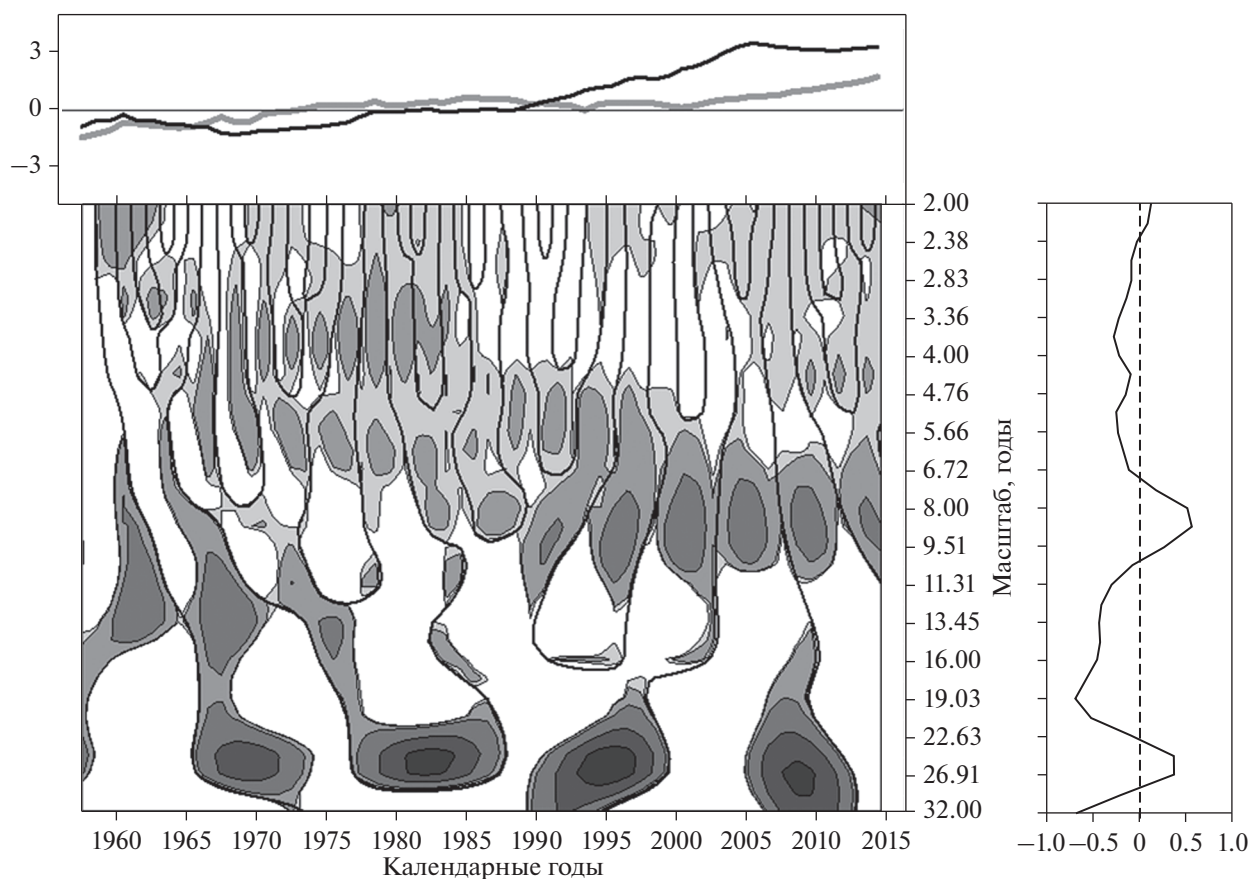
Возвращаясь к диапазону масштабов от 8 до 25 лет, можно видеть, что в его верхней половине (масштабы менее примерно 15 лет) форма и взаимное расположение серых и белых областей резко различаются до и после примерно 1987 календарного года. В первом случае, серые и белые области встречаются почти на равных, причем все серые области оконтурены справа жирными линиями. Это свидетельствует о лидировании вариаций этих масштабов в ряду 0–700 м и их запаздывании в ряду 0–2000 м. Во втором же случае видны только довольно крупные серые области, оконтуренные с обоих краев жирными линиями, что говорит о полной синфазности соответствующих вариаций.

Это различие может быть следствием какого-то сдвига в климатическом режиме, произошедшем до 1987 календарного года. Однако не исключено, что это — результат вышеупомянутой временной неоднородности рассматриваемых рядов, связанной с тем, что в ранние годы количество и качество гидрофизических измерений было более низким, чем в поздние календарные годы.

Несколько иная картина наблюдается в вейвлетных масштабах от примерно 15 до 25 лет. В этом диапазоне масштабов видна довольно четкая полоса из пяти серых областей, повторяющихся во времени периодическим образом, т.е. видна кажущаяся цикличность изменений теплосодержания со средним периодом примерно 22 года. Это совпадает с известным циклом Хейла гелиомагнитной активности. Но считать это совпадение было бы опрометчиво, ибо видны только три цикла и формальный тест статистической значимости, наверняка, признает эту полосу игрой случая. Однако циклы с таким периодом наблюдались во многих ранее выполненных исследованиях (см., например, [5, 9, 13, 16, 17]). Этого, по нашему мнению, достаточно, чтобы считать найденный здесь примерно 22-летний цикл реальным.

Первые три из них (1957–1987 гг.) оконтурены жирными линиями с обеих сторон, но последние две (1987–2013 гг.) окаймлены жирными линиями только справа, после чего их продолжают белые области длительностью по времени в 2–3 года. Значит, вначале вариации рассматриваемого диапазона масштабов были в обоих рядах синфазными, но после 1987 календарного года вариации в ряду 0–700 м стали лидировать.

Значит ли это, что после 1987 г. все-таки произошло какое-то качественное изменение в динамике теплосодержания рассматриваемых слоев? Отвечая на этот вопрос, надо учесть, что измерений в нижней части слоя 0–2000 м даже сейчас меньше, чем в верхней части, и динамика ряда 0–2000 м, во многом, определяется измерениями в верхнем подслое 0–700 м.



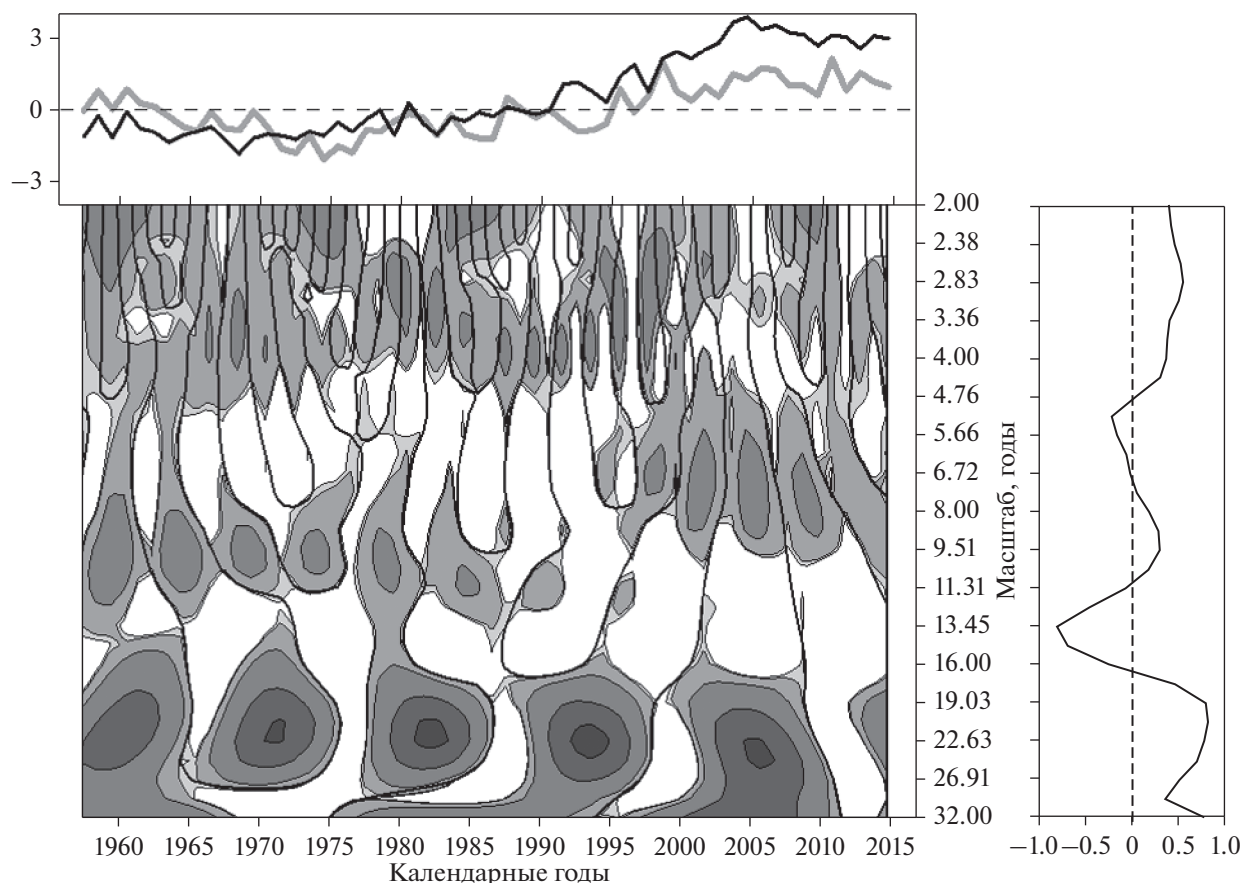
**Рис. 2.** То же, что на рис. 1, но для вейвлетных кросскорреляций рядов теплосодержания слоев 0–700 м (черная линия) и 700–2000 м (серая линия).

Поэтому, невзирая на то, что разработчики рядов теплосодержания не посчитали возможным показывать отдельный ряд для слоя 700–2000 м, в данной работе такой ряд все же был подсчитан путем простого вычитания теплосодержания слоя 0–700 м из ряда теплосодержания слоя 0–2000 м. Строго говоря, получаемый путем вычитания ряд является довольно грубой оценкой истинного ряда теплосодержания для слоя 700–2000 м, ибо теплосодержание каждого слоя морской воды вычисляется путем интегрирования профиля температуры, измеренного внутри этого слоя, с учетом плотности и теплоемкости воды в этом слое.

Рисунок 2 показывает картину CrossWT ряда 0–700 м с так полученным рядом 700–2000 м. Эта картина резко отличается от картины, показанной на рис. 1, в том числе и в масштабах около двадцати лет. Резко различаются также графики средних по времени вейвлетных кросскорреляций. На рис. 1 они были большими положительными практически для всех масштабов. Для масштабов более восьми лет эти средние кросскорреляции близки к 1.0. Это подтверждает предположение, что вариации теплосодержания слоя 0–2000 м сильно зависят от гидрофизических наблюдений в верхнем подслое 0–700 м.

В контрасте с этим, график средних по времени вейвлетных корреляций на рис. 2 показывает фактическое отсутствие связей между изменениями теплосодержания верхнего и нижнего подслоев. Средняя кросскорреляция остается довольно высокой (около 0.6) только для вейвлетных масштабов около восьми лет и около 0.4 для масштабов более двадцати лет. В промежуточном диапазоне масштабов она даже отрицательна (до  $-0.7$ ).

Полоса серых областей в масштабах примерно двадцати лет и более существенно изменилась на рис. 2 по сравнению с рис. 1. Все видимые в этой полосе серые области (их осталось четыре) существенно уменьшились по размеру и стали отделяться друг от друга довольно широкими по времени белыми областями. При этом самая левая на рисунке серая область, представляющая примерно 20-летнее колебание в годы до 1974 календарного года, окаймлена жирной линией слева, но не справа. Это могло бы говорить о лидировании в те годы примерно 20-летних вариаций теплосодержания в нижнем подслое 700–2000 м. Однако данные наблюдений для этих ранних лет таковы, что отличие этого раннего колебания от более



**Рис. 3.** То же, что на рис. 1, но для вейвлетных кросскорреляций ряда теплосодержания слоя 0–700 м (черная линия) и ряда температуры водной поверхности Северной Атлантики (серая линия).

поздних вполне можно отнести на счет ошибок этих наблюдений.

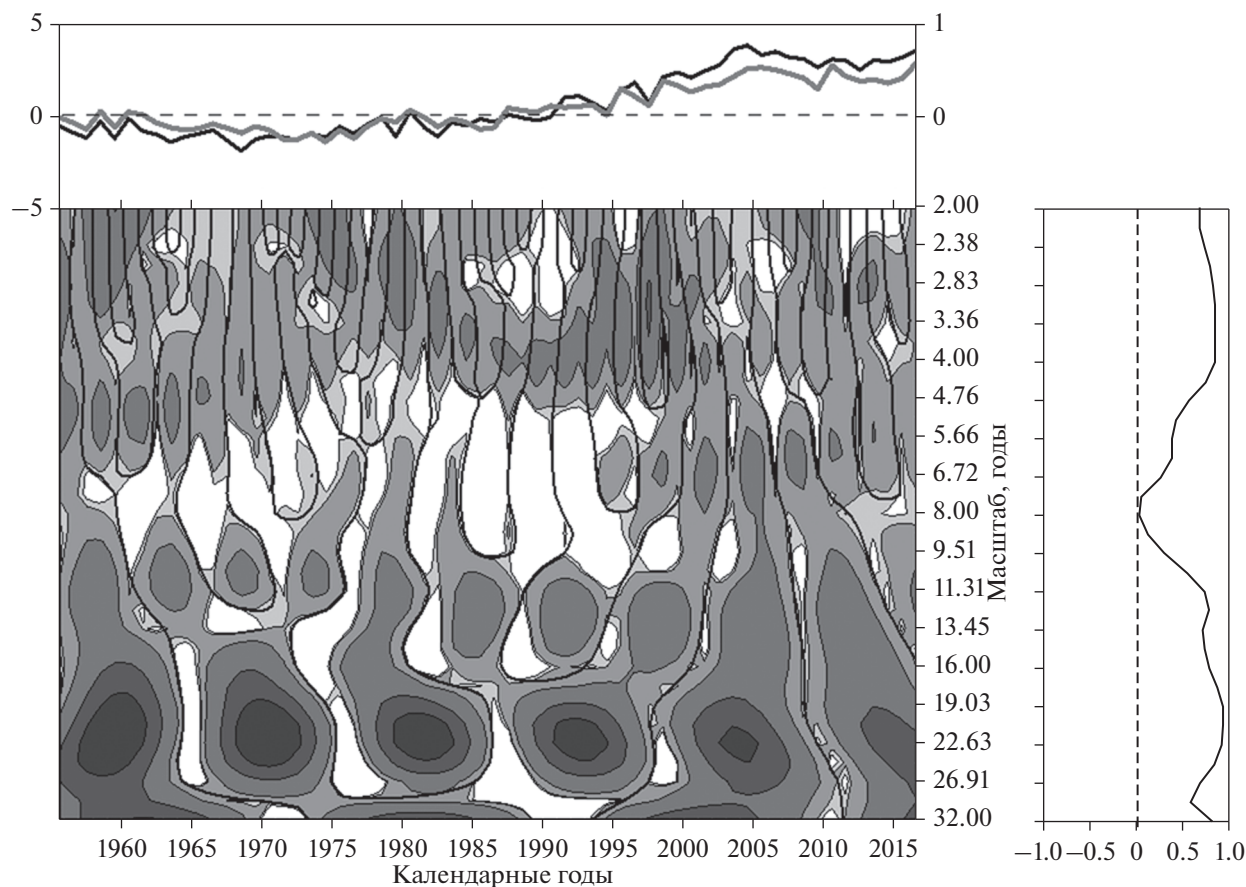
Три серые области, относящиеся к календарным годам после 1974 календарного года, окаймлены справа жирными линиями. Это означает запаздывание вариаций в ряду теплосодержания нижнего подслоя 700–2000 м на 3–5 лет по сравнению с соответствующими вариациями теплосодержания верхнего подслоя 0–700 м. В среднем это дает скорость распространения аномалий теплосодержания сверху вниз в 200 м за год.

Рисунок 3 показывает картину CrossWT для ряда 0–700 м с рядом средней температуры водной поверхности Северной Атлантики, построение которого описано в [11] и который являлся объектом исследования в первой части данной работы [6]. В соответствии с работой [10] ожидалось, что колебания температуры водной поверхности будут опережать соответствующие колебания теплосодержания слоя 0–700 м. Однако для примерно 22-летних колебаний картина CrossWT на рис. 3 показывает обратное. А именно, все пять серых областей, видимые на картине CrossWT на рис. 3, в этих вейвлетных масштабах окаймлены жирной линией справа, т.е. теплосодержание слоя

0–700 м лидирует и в этом случае, хотя это лидерование не превышает 2–3 лет.

Этот результат противоречит общепринятому представлению о распространении в океане температурных аномалий сверху вниз. Можно предположить, что он получается просто потому, что подавляющее большинство измерений температуры поверхности Северной Атлантики делается на коммерческих судах, плавающих по вполне определенным маршрутам, а измерения температуры в толще океана делаются со специальных судов, этих маршрутов не придерживающихся. Чтобы проверить это, была построена картина CrossWT ряда теплосодержания 0–700 м с рядом средней температуры самого верхнего слоя океана 0–100 м (слоя сезонного термоклина), построенного по измерениям на экспедиционных судах, как и для слоев 0–700 и 0–2000 м.

Эта картина показана на рис. 4. Видно, что примерно 22-летние вариации теплосодержания в слое 0–700 м, по-прежнему, лидируют, хотя время упреждения меньше, чем для температуры водной поверхности (всего 1–2 года). Так что вышеупомянутое объяснение феномена распространения температурных колебаний снизу вверх



**Рис. 4.** То же, что на рис. 1, но для вейвлетных кросскорреляций ряда теплосодержания слоя 0–700 м (черная линия) и ряда средней температуры слоя 0–100 м Северной Атлантики (серая линия).

неоднородным составом наблюдений должно быть отброшено.

Что на самом деле возбуждает эти вариации, еще предстоит выяснить. Здесь можно только отметить, что солнечные лучи не проникают так глубоко в океан, как на 700 м. Поэтому вариации суммарной приходящей к Земле солнечной радиации не могут вызывать 22-летнее колебание. К тому же у них главным циклом является 11-летний, а 22-летний очень слаб. Зато вода не препятствует проникновению в толщу океана гелиомагнитного излучения, и при этом соленая вода не является электрически нейтральной. Так что можно предполагать прямое воздействие Хейловского цикла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования, в ходе которого временные вариации теплосодержания верхних слоев и температуры водной поверхности Северной Атлантики исследовались с помощью многомасштабного вейвлетного анализа, обнаружено, что во всех рассмотренных слоях эти

вариации содержат кажущуюся периодической (примерно 22 года) компоненту.

Колебания этой компоненты распространяются со временем таким образом, что внутри слоя 0–700 м они лидируют по фазе в сравнении с такими же колебаниями в слое 0–2000 м. Этот факт соответствует общепринятым представлениям о распространении температурных вариаций в толще океана сверху вниз.

Вместе с тем, обнаружен факт, противоречащий этим представлениям. Он состоит в том, что примерно 20-летние вариации лидируют также по сравнению с соответствующими вариациями температуры водной поверхности Северной Атлантики, а также с соответствующими вариациями средней температуры самого верхнего 100-метрового слоя сезонного термоклина. Из этого следует, что источник этих примерно 22-летних температурных вариаций расположен в толще океана, а не на его поверхности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Монин А.С., Сонечкин Д.М. Доказательство упреждения изменений



- концентрации парниковых газов вариациями температуры в данных станции “Восток” // Докл. РАН. 2004. Т. 396. № 5. С. 686–690.
2. Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Парренин Ф., Сонечкин Д.М. Исследование разномасштабных взаимосвязей между изменениями приземной температуры воздуха и концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере // Лед и Снег. 2016. Т. 56. № 4. С. 533–544. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-4-533-544>
  3. Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Сонечкин Д.М. О связи антропогенного роста концентрации углекислого газа в атмосфере и современного потепления // Докл. РАН. 2017. Т. 477. № 1. С. 87–91.
  4. Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Сонечкин Д.М. О соотношениях лидирования-запаздывания между атмосферными трендами температуры и концентрации углекислого газа в период плейстоцена // Докл. РАН. 2016. Т. 467. № 6. С. 709–712.
  5. Вакуленко Н.В., Нигматулин Р.И., Сонечкин Д.М. К вопросу о глобальном изменении климата // Метеорология и гидрология. 2015. № 9. С. 89–97.
  6. Вакуленко Н.В., Сонечкин Д.М. Дирижеры современных изменений температуры водной поверхности Северной Атлантики // Океанология. 2019. Т. 59. № 6. С. 895–902.
  7. Даценко Н.М., Иващенко Н.Н., Сонечкин Д.М. Свойства изменения полей естественных ортогональных составляющих полей температуры Северной Евразии в XX веке // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2011. Т. 47. № 1. С. 35–49.
  8. Abraham J.P., Baringer M., Bindoff N.L. et al. A review of global ocean temperature observations: Implications for ocean heat content estimates and climate change // Rev. Geophys. 2013. V. 51. № 3. P. 450–483. <https://doi.org/10.1002/rog20022>
  9. Chylek P., Folland C.K., Dijkstra H.A. et al. Ice-core data evidence for a prominent near 20 year time-scale of the Atlantic Multidecadal Oscillation // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. L13704. P. 1–5. <https://doi.org/10.1029/2011GL047501>
  10. Gebbie G., Huybers P. The Little Ice Age and 20th-century deep Pacific cooling // Science. 2019. V. 363. P. 70–74. <https://doi.org/10.1126/science.aar8413>
  11. Kaplan A., Cane M.A., Kushnir Y. et al. Analyses of global sea surface temperature 1856–1991 // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 18567–18589. <https://doi.org/10.1029/97JC01736>
  12. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco: W.H. Freeman, 1982. 460 p.
  13. Scafetta N., West B.J. Phenomenological reconstructions of the solar signature in the Northern Hemisphere surface temperature records since 1600 // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. D24S03. P. 1–10. <https://doi.org/10.1029/2007JD008437>
  14. Torrence D.C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1998. V. 79. P. 61–78. <https://doi.org/10.1175/1520-0477>
  15. Torrence D.C., Webster P.J. Interdecadal changes in the ENSO–monsoon system // J. Clim. 1999. V. 12. P. 2679–2690. <https://doi.org/10.1175/1520-0442>
  16. Wang G., Yang P., Zhou X. Identification of the driving forces of climate change using the longest instrumental temperature record // Sci. Rep. 2017. V. 7. 46091. <https://doi.org/10.1038/srep46091>
  17. Yang P., Wang G., Zhou X. Causality of global warming seen from observations: a scale analysis of driving force of the surface air temperature time series in the Northern Hemisphere // Clim. Dyn. 2016. V. 46. P. 3197–3204. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2761-4>

## Conductors of Heat Content Changes of the North Atlantic Ocean Layers

N. V. Vakulenko<sup>a</sup>, D. M. Sonechkin<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: dsonech@ocean.ru*

It is considered that changes of the North Atlantic’s heat content can be a source of surprises in evolution of the present-day climate, especially the climate of Europe. To investigate this problem the monitoring RAPID program has been organized. However results of such monitoring cover still too short time interval to come to any particular conclusions. In this work, using wavelets, the heat content variations in the oceanic layers of 0–700 and 0–2000 m are analysed from the middle of the XX century. Their connections with variations of the mean temperature of the 0–100 m layer as well as with earlier analysed temperature variations of the North Atlantic sea-surface temperature also are analyzed. It is found that, against a background of a total increase of the heat content, variations of all specified characteristics reveal a periodicity similar to the known approximately 22-year long Hale’s cycle of the heliomagnetic activity. In the layer of the 0–700 m this periodicity leading on its phase not only the corresponding periodicity in the layer of the 0–2000 m that well corresponds the generally accepted opinion that anomalies of the heat content extend from top to down layers of ocean, but also in the mean temperature of the 0–100 m layer as well as in the sea-surface temperature. It allows to believe that the heliomagnetic activity immediately influences the upper 0–700 m layer of the ocean, and already then extend down and up.

**Keywords:** changes in the heat content of the North Atlantic, solar activity, wavelet analyse