

УДК 911.2:551.465.63

## ПРОГНОЗЫ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГОДОВОГО СОДЕРЖАНИЯ ТЕПЛА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ВОД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ

*Холопцев А.В.<sup>1</sup>, Никифорова М.П.<sup>2</sup>*

*1 – Севастопольская морская академия, Севастополь, Россия;*

*2 – Севастопольский национальный технический университет, Севастополь, Россия*

*E-mail: maha.ukraine@gmail.com*

Изучены возможности прогнозирования изменений среднегодового содержания тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики с учетом влияния на них предыстории вариаций солнечной активности, а также концентрации в тропосфере диоксида углерода. Сопоставлены прогнозы, соответствующие всем возможным наборам этих факторов. Это позволило выявить набор подобных факторов, учет которых в качестве аргументов прогностической модели изучаемого процесса обеспечивает минимальный уровень максимальных ошибок прогнозирования с упреждениями 1 – 5 лет. Разработанные прогнозы наиболее реалистичны, точны, и осуществляются в будущем, при условии, что закономерности, которые обуславливают статистические связи изучаемого процесса и его глобальных факторов, не изменятся.

**Ключевые слова:** содержание тепла в верхнем 700-метровом слое Северной Атлантики, солнечная активность, концентрация диоксида углерода, прогноз, множественно-регрессионная модель.

### ВВЕДЕНИЕ

Вариации содержания тепла в верхних слоях вод океанических регионов являются значимым фактором изменений климата, а также ландшафтных комплексов суши, расположенных в зонах их влияния. Поэтому совершенствование методик их прогнозирования является актуальной проблемой физической географии и геофизики ландшафтов.

Решение рассматриваемой проблемы представляет наибольший интерес для океанических регионов, в зоне влияния которых расположены густонаселенные и экономически развитые территории. Одним из них является Северная Атлантика, в зоне влияния которой расположены вся территория Европы, районы Северной Америки, приближенные к ее восточному побережью, а также Северная Африка.

Основой современных представлений о закономерностях изменения содержания тепла в верхних слоях вод Северной Атлантики являются работы В.Н. Степанова, С. С. Лаппо, У. Брокера, В.А. Буркова, В. В. Шулейкина, Н. П. Булгакова, В.Ф.Суховой и др. отечественных и зарубежных ученых.

Установлено, что к числу основных причин изменений этой характеристики Северной Атлантики относятся взаимодействие ее поверхностных вод с атмосферой, их горизонтальная и вертикальная циркуляция, а также поглощение ими суммарной солнечной радиации и обратного теплового излучения атмосферы [1-4]. Существенное влияние на перечисленные процессы оказывают глобальные факторы. Из них, к их числу наиболее изученных, относятся усиление парникового эффекта в земной атмосфере, а также солнечная активность.

По мнению Международной группы экспертов по проблемам изменения климата, основной причиной усиления парникового эффекта является происходящее под влиянием антропогенных факторов увеличение содержания в атмосфере парниковых газов и прежде всего диоксида углерода. В XXI в., при наиболее реалистичных сценариях развития человечества, эта тенденция получит дальнейшее развитие, что вызовет дальнейшее усиление парникового эффекта [5].

Это позволяет предполагать, что данный процесс явится также значимым фактором изменений содержания тепла в верхних слоях вод Северной Атлантики, который будет способствовать его увеличению.

Вопрос о значимости влияния солнечной активности на изменения рассматриваемой характеристики ныне относится к числу дискуссионных. Впервые статистическую связь между «возмущениями климата» и солнечной активностью установил в 1902 году М.А. Боголепов [6]. Это фактор считали первопричиной климатических изменений К.К.Марков [7], П.П. Предтеченский [8], А. В. Шнитников [9], М.С.Эйгенсон [10]. Того же мнения придерживаются и такие современные ученые, как Д. Эдди [11], Е.П. Борисенков [12], Х. Абдулсаматов [13], К. Моханакумар [14] и др.

Согласно [13] на первую половину XXI в. прогнозируется пониженный средний уровень циклов солнечной активности, вследствие чего, несмотря на продолжающееся увеличение содержания в атмосфере парниковых газов, следует ожидать существенного похолодания климата (аналогично тем, которые имели место в конце XVI и начале XIX в.).

Установлены некоторые природные механизмы, благодаря которым вариации солнечной активности действительно способны ощутимо влиять на потоки суммарной солнечной радиации и тепла, поглощаемые верхним слоем вод океанов.

По мнению К. Кодеры [15], одним из них является происходящее при повышении солнечной активности, увеличение потока ультрафиолетовой радиации, который поглощается в стратосфере озоном. Это приводит к значимому увеличению потока ее теплового излучения, поступающего в тропосферу и далее на поверхность океана, что приводит к потеплению его поверхностных вод.

Согласно гипотезы М. Балдвина [16], влияние солнечной активности на суммарную солнечную радиацию, которая поглощается земной поверхностью, обусловлено модуляцией этим фактором потока космических лучей, входящих в земную атмосферу (Форбуш –эффект). При взаимодействии космических лучей с атмосферой происходит ионизация молекул воздуха, которые становятся атмосферными ядрами конденсации [17].

Поскольку в годы максимумов солнечной активности потоки космических лучей, участвующих в данном процессе, уменьшаются, средняя оптическая плотность облачности также снижается, что приводит к увеличению потока суммарной солнечной радиации, достигающей поверхности океана. Данный эффект, судя по опубликованным оценкам, способен приводить к вариациям потока поглощаемой в океане суммарной солнечной радиации с амплитудой до 6,5% [16, 17].

## ПРОГНОЗЫ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГОДОВОГО СОДЕРЖАНИЯ ТЕПЛА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ВОД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ...

Несмотря на несомненное существование в природе обоих указанных механизмов, значимость их влияния на изменения содержания тепла в различных слоях вод Северной Атлантики ранее количественно не оценивалось, что вызывает понятные сомнения по поводу ощутимости зависимости изучаемого процесса от вариаций солнечной активности. Подобные сомнения обусловлены еще и тем, что амплитуда изменений солнечной постоянной на протяжении цикла солнечной активности не превышает 0,1% [14]. К тому же данный внешний фактор влияет на климатическую систему планеты совместно с таким мощнейшим внутренним фактором, как взаимодействие океана и атмосферы. Поэтому, по мнению А. С. Мониной [18], А.Б. Полонского [19], и многих других ученых, влияние на изменения климата вариаций солнечной активности значимым не является. Правы ли они – покажет будущее.

Даже если они правы, и существенной причинной связи между солнечной активностью и изменениями содержания тепла в различных слоях вод океанических регионов нет, при определенных условиях между ними могут существовать значимые статистические связи, учет которых при моделировании и прогнозировании изучаемого процесса будет способствовать повышению эффективности их результатов.

Несмотря на то, что основные качественные закономерности, обуславливающие изменения содержания тепла в различных слоях океанов, ныне установлены, возможности описания их с помощью различных количественных физических моделей, учитывающих влияние обоих рассматриваемых глобальных факторов, до сих пор изучены недостаточно.

Так как изменения содержания тепла в верхнем слое вод Северной Атлантики представляют собой многофакторный процесс, а многие из его факторов являются ненаблюдаемыми, для его моделирования и прогнозирования могут быть применены статистические методы. Среди них одним из наиболее универсальных является метод множественной регрессии [20]. Если статистические связи изучаемого процесса и его факторов, учитываемых в качестве аргументов математической модели, достаточно сильны и устойчивы к временным сдвигам соответствующих временных рядов, данный метод может быть применен и для его прогнозирования. Существенной проблемой при этом является выявление среди множества факторов изучаемого процесса такого их набора, учет которого в качестве аргументов множественно-регрессионной модели сообщит ей указанные свойства. Возможности прогнозирования изменений содержания тепла в различных слоях вод Северной Атлантики, с использованием метода множественной регрессии, а также подобного набора аргументов, состоящего из различных фрагментов временных рядов рассматриваемых глобальных процессов, ранее не рассматривались.

Результаты мониторинга изменений содержания тепла в верхнем 700 м слое вод Северной Атлантики в период 1955-2014 г. в виде временных рядов среднемесячных значений этой характеристики, представлены в [21]. Построенная по ним зависимость среднегодовых значений данной характеристики приведена на рис. 1.

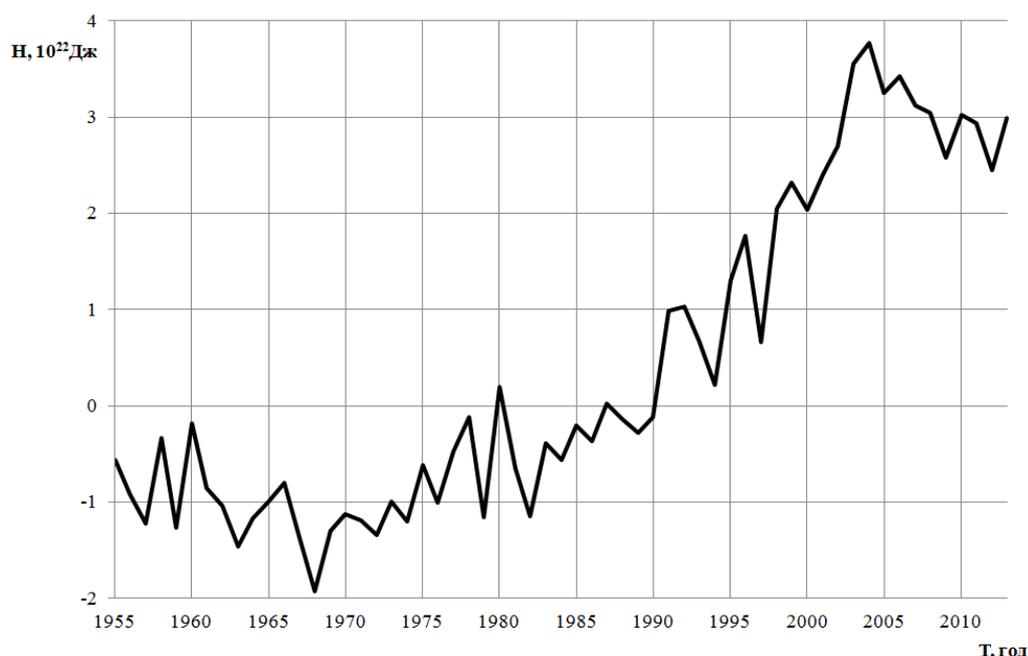


Рис. 1. Зависимость от времени среднегодовых значений содержания тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики по данным [21]

Из рис. 1 видно, что в период до 2003 г. содержание тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики устойчиво возрастало, однако в дальнейшем наметилась противоположная тенденция (что соответствует представлениям [13]). Последнее наверняка приводит к уменьшению потоков тепла и влаги, поступающих с поверхности Северной Атлантики в атмосферу, что не может не влиять на климат регионов мира, расположенных в зоне ее влияния. Поэтому разработка прогнозов дальнейшего хода этого процесса на первую половину XXI в. представляет значительный теоретический и практический интерес.

Временные ряды усредненных по всей тропосфере среднегодовых концентраций в воздухе диоксида углерода, фактически измеренных с 1765 г. и прогнозируемых на период до 2500 г., содержатся в [22]. Данные о состоянии солнечной активности в период 1749-2013 гг., описываемом среднегодовыми значениями чисел Вольфа, могут быть получены из [23]. Это делает рассматриваемую проблему не только актуальной, но и практически разрешимой.

Учитывая изложенное, как объект исследования в данной работе выбраны изменения среднегодового содержания тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики. Предметом исследования являются прогнозы изменений в первой половине XXI в. среднегодового содержания тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики, которые учитывают влияние на него упомянутых глобальных факторов.

## ПРОГНОЗЫ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГОДОВОГО СОДЕРЖАНИЯ ТЕПЛА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ВОД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ...

Целью работы является изучение особенностей влияния состава набора аргументов множественно-регрессионной модели изменений среднегодового содержания тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики на точность получаемых с ее помощью прогнозов этого процесса, а также изучение особенностей подобных прогнозов на первую половину XXI в.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

1. Выявление условий, при которых между предысториями рассматриваемых глобальных факторов, а также изменениями среднегодового содержания тепла в верхнем слое вод Северной Атлантики в 1955-2013 гг., существуют значимые и устойчивые статистические связи.

2. Сопоставление прогнозов изменений состояния изучаемого процесса в первой половине XXI в., построенных с учетом выявленных связей, при различных наборах аргументов его множественно-регрессионной модели.

### **ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

При решении рассматриваемых задач, как фактический материал об изменениях содержания тепла в верхнем 700 м. слое вод Северной Атлантики в период 1955-2014 гг. использованы временные ряды среднемесячных значений этой характеристики, представленные в [21]. Усредняя члены этих рядов, относящиеся к одному году, получен изучаемый далее ряд его среднегодовых значений.

Также как фактический материал использованы временные ряды среднегодовых значений:

- средней концентрации в тропосфере диоксида углерода (для периода 1765- 2013 гг. это данные фактических измерений, а для периода 2014-2500 гг. прогнозы) [22];
- чисел Вольфа (в период 1749-2013 гг.) [23].

Методика исследования разработана с учетом того, что роли в изменениях состояния изучаемого процесса рассматриваемых глобальных факторов достоверно не установлены. В подобной ситуации рассмотрены три гипотезы.

Гипотеза 1. Вариации солнечной активности на изучаемый процесс не влияют, а главным глобальным фактором является увеличение концентрации в тропосфере диоксида углерода.

Гипотеза 2. Вариации солнечной активности являются главным фактором, обуславливающим изучаемый процесс, в то время как рост концентрации в тропосфере диоксида углерода на него практически не влияет.

Гипотеза 3. Оба фактора значимо влияют на изучаемый процесс.

Учитывая длину рассматриваемых временных рядов среднемесячных значений содержания тепла в верхнем 700-метровом слое океана, а также учитывая необходимость использования некоторой их части для проверки качества прогнозов, как прогностическая модель применено линейное уравнение множественной регрессии изучаемого процесса, имеющее вид:

$$Y_i^N = c_0 + \sum c_k \cdot x_{ik}, (1)$$

здесь  $Y_i$  – значение среднегодового содержания тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики в  $i$  году;

$N$  – количество аргументов рассматриваемой модели, которое выбрано равным 29;

$x_{ik}$  – значение  $k$  аргумента модели, соответствующего  $i$  году;

$c_k$  – значение  $k$  коэффициента рассматриваемой модели рассчитанное по методу наименьших квадратов и соответствующих  $i$  году.

При вычислении значений  $c_k$  предполагалось, что они образуют компоненты  $(N + 1)$ -мерного вектора  $C$ , который находится из соотношения:

$$C = A^{-1} \cdot B, \quad (2)$$

где  $A$  – квадратная матрица ранга  $(N + 1)$ , размерами  $(N + 1) \times (N + 1)$ , определяемая, как:

$$A = \begin{Bmatrix} M & \sum_{i=1}^M x_{i,1} & \sum_{i=1}^M x_{i,2} & \dots & \sum_{i=1}^M x_{i,N} \\ \sum_{i=1}^M x_{i,1} & \sum_{i=1}^M x_{i,1}x_{i,1} & \sum_{i=1}^M x_{i,2}x_{i,1} & \dots & \sum_{i=1}^M x_{i,N}x_{i,1} \\ \sum_{i=1}^M x_{i,2} & \sum_{i=1}^M x_{i,1}x_{i,2} & \sum_{i=1}^M x_{i,2}x_{i,2} & \dots & \sum_{i=1}^M x_{i,N}x_{i,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^M x_{i,N} & \sum_{i=1}^M x_{i,1}x_{i,N} & \sum_{i=1}^M x_{i,2}x_{i,N} & \dots & \sum_{i=1}^M x_{i,N}x_{i,N} \end{Bmatrix}$$

$B$  –  $(N+1)$ -мерный вектор столбец, определяемый соотношением:

$$B = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^M y_i \\ \sum_{i=1}^M y_i x_{i,1} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^M y_i x_{i,N} \end{Bmatrix}$$

$A^{-1}$  – матрица обратная по отношению к  $A$ ,

$M$  – длина фрагментов временных рядов изучаемого процесса и его факторов, учитываемых при вычислении коэффициентов  $c_k$ . Значение  $M$  выбрано равным 54. При этом пять последних членов ряда значений изучаемой характеристики (общее количество которых – 59) использованы для оценки качества прогнозов.

В каждый ряд, соответствующий тому или иному аргументу, как его члены, включено 91 его значение. Из них для вычислений  $c_k$  использованы лишь 54, начинающиеся с члена, соответствующего году начала рассматриваемого фрагмента ряда  $Y_i$ .

Оставшиеся члены этого ряда использованы для построения прогнозов.

## ПРОГНОЗЫ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГОДОВОГО СОДЕРЖАНИЯ ТЕПЛА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ВОД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ...

Каждой из выдвинутых гипотез соответствуют свои наборы аргументов рассматриваемой модели.

Гипотезе 1 соответствует единственный набор аргументов  $x_{ik}$ , образованный из фрагментов одного лишь временного ряда среднегодовых концентраций в тропосфере диоксида углерода, которые связаны с изучаемым процессом наиболее сильно. Как количественная характеристика силы этой связи рассматривалось соответствующее данному сдвигу значение взаимнокорреляционной функции (далее ВКФ).

Гипотезе 2 отвечает также единственный набор аргументов, образованный из наиболее существенных фрагментов временного ряда среднегодовых значений чисел Вольфа. Годы начала этих фрагментов, статистически связанных с изучаемым процессом наиболее сильно, определены с использованием метода корреляционного анализа. При этом рассчитаны ВКФ фрагментов ряда  $Y_i$ , начинающихся с 1955-1959 гг. и имеющих длину 54 члена, а также временного ряда чисел Вольфа, для периода 1749-2013 гг.

Значения ВКФ, соответствующие тому или иному году начала ряда чисел Вольфа, сопоставлены с уровнем 95% порога достоверной корреляции, рассчитанного с учетом числа степеней свободы этого ряда.

Как значимые отобраны фрагменты ряда чисел Вольфа, которым соответствуют значения ВКФ, превышающие по модулю уровень выбранного порога. В рассматриваемый набор аргументов вошли все фрагменты данного ряда, которые отнесены к значимым для каждого из пяти фрагментов ряда  $Y_i$ .

Гипотезе 3 соответствует 28 наборов аргументов  $x_{ik}$ , образованных из тех же фрагментов ряда чисел Вольфа, при условии, что те или иные фрагменты этого ряда, статистические связи которых с изучаемым процессом являются наиболее слабыми, замещены на такое же количество фрагментов ряда среднегодовых концентраций в тропосфере диоксида углерода, связи которых с ним являются наиболее сильными. Рассматривались наборы, в которых количество замещаемых фрагментов лежало в пределах от 1 до 28.

Для оценки качества моделей, соответствующих тому или иному набору аргументов, с их использованием построены прогнозы изменений среднегодового содержания тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики на 2009-2013 гг., которые сопоставлены с известными фактическими значениями этой характеристики.

Каждый прогноз на  $i$  год рассчитан путем подстановки в модель (1), коэффициенты  $c_k$  которой вычислены с использованием соответствующего фрагмента предыстории изучаемого процесса длиной 54 года.

Как мера качества множественно-регрессионной модели, соответствующей тому или иному набору своих аргументов, использовано максимальное значение ошибки окончательного прогноза, для 2009-2013 гг.

Сопоставлены прогнозируемые на первую половину XXI в., с использованием того или иного набора аргументов модели (1), тенденции изменения содержания тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

В соответствии с описанной методикой рассчитаны ВКФ различных фрагментов временного ряда изучаемого процесса, отличающихся годом своего начала, а также временных рядов рассматриваемых факторов. Также для них определены с учетом числа степеней свободы значения 95% порога достоверной корреляции по критерию Стьюдента. Некоторые примеры полученных при этом ВКФ, а также соответствующих им таких порогов приведены на рис. 2.

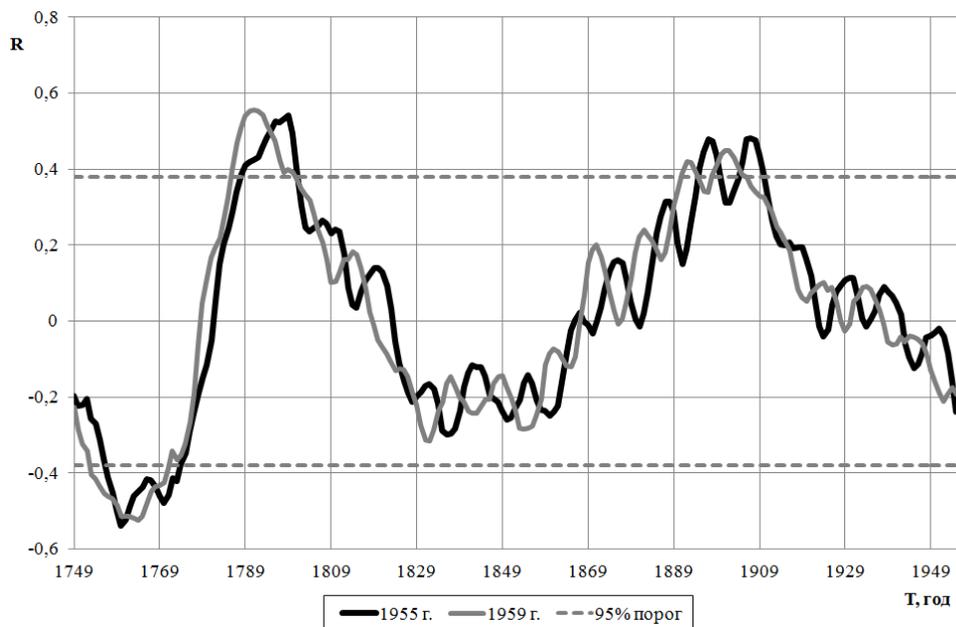
Из рис. 2 следует, что рассматриваемые ВКФ обладают устойчивостью к году начала фрагмента временного ряда среднегодовых значений содержания тепла в верхнем 700-метровом слое Мирового океана. При этом, с достоверностью не ниже 95% вывод о значимости статистической связи фрагментов ряда изучаемого процесса может быть сделан в отношении фрагментов рядов чисел Вольфа, которые их опережают на 45-64 года, 155-167 лет и на 184-198 лет. Аналогичный вывод может быть сделан и в отношении большинства фрагментов ряда концентраций диоксида углерода. Исключением являются его фрагменты, опережающие по времени рассматриваемый процесс на 156-167 лет.

Важно отметить, что при нулевых временных сдвигах между фрагментами рядов чисел Вольфа и рядов изучаемых характеристик их статистическая связь значимой не является, а значение коэффициента их корреляция отрицательно. Из этого следует, что сомнения о наличии значимой причинной связи между данными процессами, высказываемые [18, 19], для условий, когда временной сдвиг между ними равен нулю, вполне обоснованы. При этом вопрос о возможности существования значимой причинной связи между ними при выявленных значениях временных сдвигов между ними остается открытым.

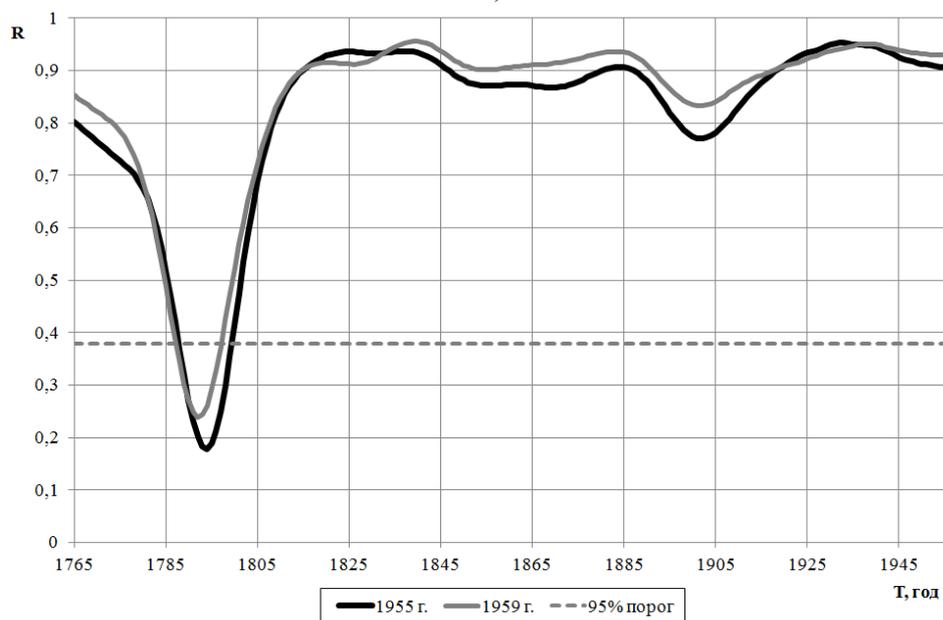
Из рис. 2 следует, что рассматриваемые ВКФ обладают устойчивостью к году начала фрагмента временного ряда среднегодовых значений содержания тепла в верхнем 700-метровом слое Мирового океана. При этом, с достоверностью не ниже 95% вывод о значимости статистической связи фрагментов ряда изучаемого процесса может быть сделан в отношении фрагментов рядов чисел Вольфа, которые их опережают на 45-64 года, 155-167 лет и на 184-198 лет. Аналогичный вывод может быть сделан и в отношении большинства фрагментов ряда концентраций диоксида углерода. Исключением являются его фрагменты, опережающие по времени рассматриваемый процесс на 156-167 лет.

Важно отметить, что при нулевых временных сдвигах между фрагментами рядов чисел Вольфа и рядов изучаемых характеристик их статистическая связь значимой не является, а значение коэффициента их корреляция отрицательно. Из этого следует, что сомнения о наличии значимой причинной связи между данными процессами, высказываемые [18, 19], для условий, когда временной сдвиг между ними равен нулю, вполне обоснованы. При этом вопрос о возможности существования значимой причинной связи между ними при выявленных значениях временных сдвигов между ними остается открытым.

**ПРОГНОЗЫ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГОДОВОГО СОДЕРЖАНИЯ ТЕПЛА  
В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ВОД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ...**



А)



Б)

Рис. 2. ВКФ фрагментов временного ряда изучаемого процесса, имеющих длину 54 года и начинающихся в 1955 г. и 1959 г., а также временных рядов чисел Вольфа (А) и концентраций диоксида углерода (Б)

Из рис. 2А следует, что значимая и устойчивая к временным сдвигам изучаемого процесса статистическая связь с фрагментами предыстории чисел Вольфа имеет место, при условии, что последние значительно опережают его по времени. Существование в климатической системе планеты механизмов, обуславливающих подобные связи, ныне вполне достоверно не установлено.

Следует отметить, что выявленные статистические связи могут являться значимыми не только в случае если такие механизмы существуют. Другой вполне реальной причиной их значимости может являться полициклический характер изменений солнечной активности.

Один из солнечных циклов – 11-ти летний, называемый циклом Швабе, проявляется в изменении количества наблюдаемых на фотосфере пятен, их групп, характеристик ультрафиолетовой и инфракрасной радиации, солнечного ветра, а также повторяемости и мощности солнечных вспышек. Максимумы 11-летнего цикла промодулированы по амплитуде более продолжительными солнечными циклами [13]. Среди последних инструментальными наблюдениями достоверно доказано существование 22-х летнего цикла Хейла, в котором происходит смена полярности магнитного поля Солнца.

Методом дендрохронологического анализа подтверждено существование векового цикла солнечной активности, имеющего продолжительность 80-90 лет и называемого циклом Гейсберга. В течении этого цикла изменяется соотношение между активностью Солнца в его Северном и Южном полушарии. Тем же методом (анализируя изменения ширины годовых колец старых деревьев) выявлен 200-210 летний цикл солнечной активности, называемый циклом Зюсса (де Врие), существование которого обусловлено изменениями радиуса фотосферы, происходящими с амплитудой 150 км, что приводит к вариациям площади ее сегмента обращенного к нашей планете. Минимумы данного цикла в прошлом неоднократно вызывали значительные похолодания климата [11, 12]. Выдвинуты предположения о существовании и более продолжительных солнечных циклов [9].

Известно, что максимумы автокорреляционной функции амплитудномодулированного колебания, описываемого соотношением:

$$Y(t) = A \sin \Phi t \sin \Omega t ,$$

где  $\Phi \gg \Omega$  соответствуют временным сдвигам, которые повторяются с периодом близким к периоду модулирующего колебания [24]. Если бы несущим колебанием являлись вариации солнечной активности с периодом, который равен средней продолжительности цикла Швабе, а модулирующим колебанием была осцилляция с периодом, равным продолжительности цикла Зюсса, то максимумы автокорреляционной функции такого ряда чисел Вольфа соответствовали бы временным сдвигам 200-210 лет и кратным им.

В действительности модулирующим колебанием является не один лишь цикл Зюсса. Как уже отмечалось выше, фактически оно представляет собой суперпозицию упомянутого цикла, с циклами Хейла и Глейсберга (а возможно и другими, более продолжительными). Это позволяет предполагать наличие значимых статистических связей между фрагментами временного ряда чисел Вольфа, сдвинутыми по времени на 45-64 года, 155-167 лет и на 184-198 лет. Для

## ПРОГНОЗЫ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГОДОВОГО СОДЕРЖАНИЯ ТЕПЛА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ВОД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ...

проверки адекватности этого предположения построена зависимость от года начала фрагмента ряда чисел Вольфа, который содержит 54 члена, коэффициента его парной корреляции с его фрагментом, соответствующим периоду 1960-2013 гг. (фактически это часть его автокорреляционной функции АКФ). Она показана на рис. 3.

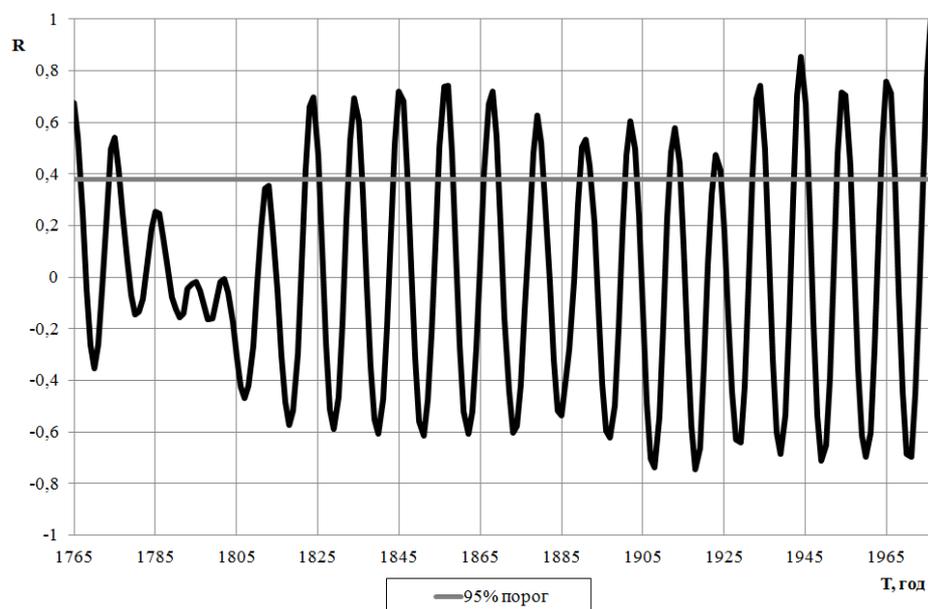


Рис. 3. Зависимость от года начала фрагмента ряда чисел Вольфа, который содержит 54 члена, коэффициента его парной корреляции с его фрагментом, соответствующим периоду 1960- 2013 гг.

Из рис. 3 видно, что многие значения автокорреляционной функции ряда чисел Вольфа, соответствующие временным сдвигам 45- 64 года и 155- 167 лет действительно превышают соответствующий уровень 95% порога достоверной корреляции по критерию Стьюдента. Несмотря на отсутствие значимых уровней данной АКФ при сдвигах 184- 198 лет, это отчасти подтверждает адекватность выдвинутого предположения и позволяет связывать вид ВКФ рассматриваемого процесса и ряда чисел Вольфа, показанный на рис. 2А, с наличием статистических связей между соответствующими фрагментами предыстории солнечной активности.

Причиной отсутствия значимой корреляции изучаемого процесса и предыстории солнечной активности при сдвигах между ними близких к нулевому, вероятно, является то, что при таких сдвигах на изменение содержания тепла в верхнем 700-метровом слое океана действуют и иные, гораздо более мощные факторы, на фоне которых влияние солнечной активности практически не ощущается.

С использованием множественно-регрессионной модели (1) и всех возможных наборов аргументов оценены абсолютные величины ошибок прогнозов с

упреждением 1-5 лет. Установлено, что для каждого фиксированного соотношения в наборе аргументов прогностической модели (1), между их количествами, которые соответствуют фрагментам ряда чисел Вольфа и фрагментам ряда концентраций диоксида углерода, значения оцененных характеристик являются наименьшими, если данный набор включает фрагменты, статистически связанные с рядом изучаемого процесса наиболее сильно. Так как силу связи между ними характеризует коэффициент их парной корреляции, для выявления таких фрагментов может быть использован метод корреляционного анализа.

Назовем наиболее эффективным набор аргументов модели (1), содержащий некоторое количество фрагментов ряда чисел Вольфа и ряда концентраций диоксида углерода, при котором абсолютные величины максимальных ошибок прогнозов с упреждением 1-5 лет являются минимальными. Очевидно, что один наиболее эффективный набор аргументов отличается от другого количеством ( $\mu$ ) входящих в него фрагментов ряда концентраций диоксида углерода, а также соответствующим значением абсолютной величины максимальной ошибки прогноза. Зависимости абсолютных величин ошибок прогнозов с упреждением 1-5 лет от значения  $\mu$  приведены на рис. 4.

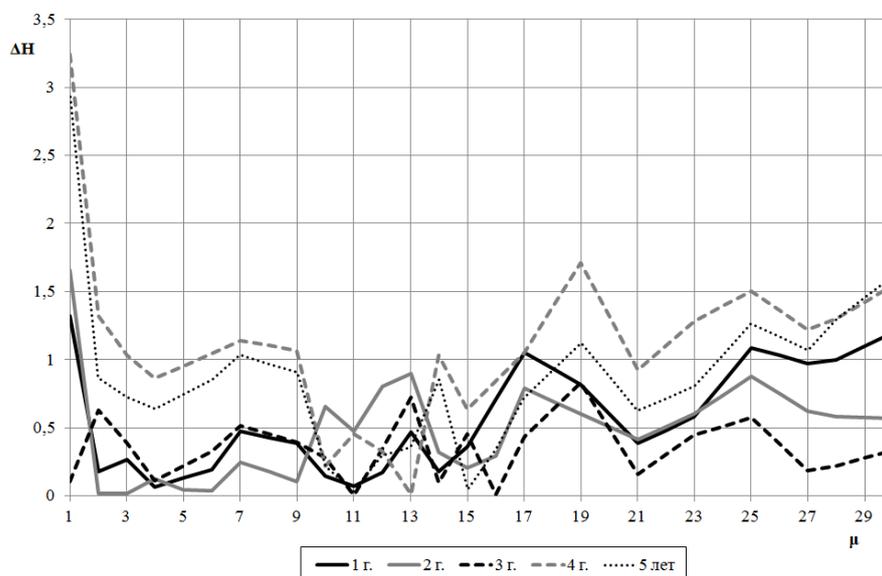


Рис. 4. Зависимости абсолютных величин ошибок прогнозов содержания тепла в верхнем 700-метровом слое Северной Атлантики с упреждением 1-5 лет от количества ( $\mu$ ) фрагментов ряда концентраций диоксида углерода, входящих в наиболее эффективный набор аргументов модели (1)

Из рис. 4 видно, что наименьшие значения рассматриваемых характеристик, при значениях упреждения 1-5 лет, соответствуют наиболее эффективному набору аргументов модели (1), включающему 10 фрагментов ряда концентраций диоксида

**ПРОГНОЗЫ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГОДОВОГО СОДЕРЖАНИЯ ТЕПЛА  
В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ВОД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ...**

углерода. Значения годов начала фрагментов временных рядов, входящих в состав этого набора, а также соответствующие значения коэффициентов модели (1) приведены в таблице 1.

Таблица 1

Годы начала фрагментов рядов чисел Вольфа (W) или концентраций диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), образующих наиболее эффективный набор аргументов самой точной прогностической модели (1), а также соответствующие им значения ее коэффициентов

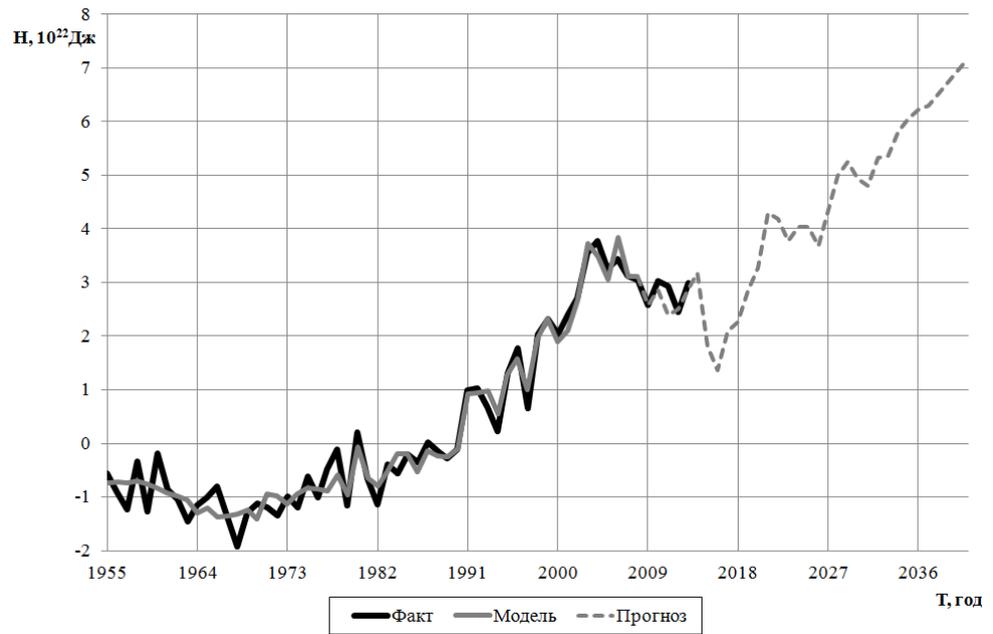
<b>К</b>	<b>Фактор</b>	<b>Год</b>	<b>c<sub>к</sub></b>	<b>К</b>	<b>Фактор</b>	<b>Год</b>	<b>c<sub>к</sub></b>
0			-2.11507	15	W	1771	0.006534
1	W	1757	-0.0087	16	W	1789	0.017731
2	W	1758	-0.00148	17	W	1790	-0.00852
3	W	1759	-0.00447	18	W	1791	-0.00907
4	W	1760	-0.00218	19	W	1792	0.011293
5	W	1761	-0.00358	20	CO <sub>2</sub>	1951	0.422451
6	W	1762	-0.00522	21	CO <sub>2</sub>	1952	-2.97682
7	W	1763	-0.00431	22	CO <sub>2</sub>	1953	6.224543
8	W	1764	-0.00078	23	CO <sub>2</sub>	1954	-8.66243
9	W	1765	-0.00179	24	CO <sub>2</sub>	1955	9.200995
10	W	1766	-0.00286	25	CO <sub>2</sub>	1956	-7.21783
11	W	1767	0.005714	26	CO <sub>2</sub>	1960	-0.2816
12	W	1768	0.000452	27	CO <sub>2</sub>	1959	0.753334
13	W	1769	-0.0019	28	CO <sub>2</sub>	1958	-0.71286
14	W	1770	-0.00102	29	CO <sub>2</sub>	1957	3.25075

Как видим из таблицы 1, а также рис. 4, наименьшие по модулю максимальные ошибки прогноза с упреждением 1-5 лет соответствуют набору ( $\mu = 10$ ), в котором содержатся, как фрагменты рядов концентраций диоксида углерода в земной атмосфере, так и рядов чисел Вольфа (т.е. адекватной представляется гипотеза 3).

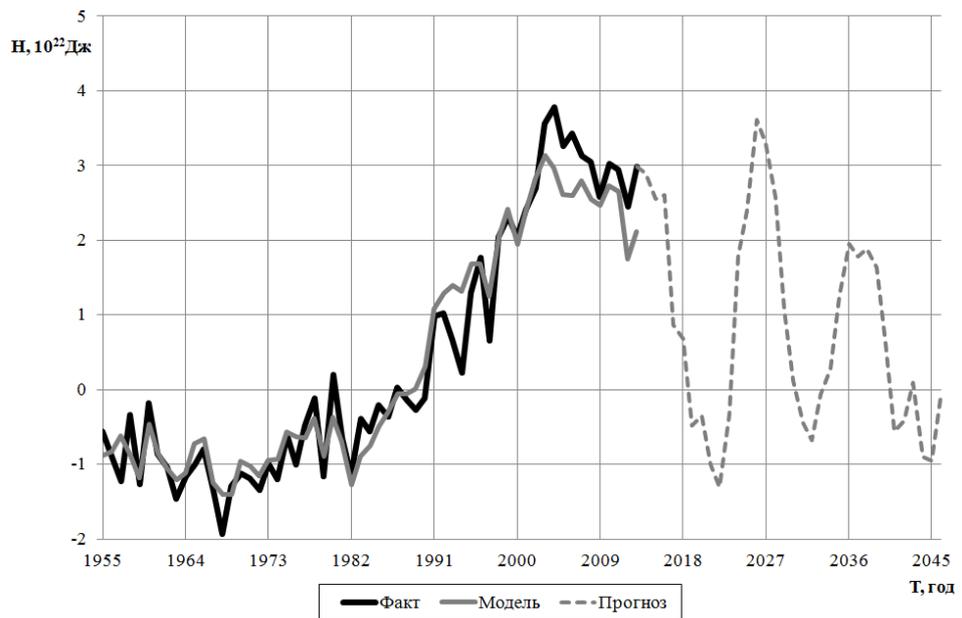
Используя описанную методику и рассчитанные ВКФ изучаемых процессов, построены прогнозы изменений содержания тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики, соответствующие всем рассматриваемым наиболее эффективным наборам ее аргументов (которым соответствует  $\mu$  от 0 до 29).

Анализ полученных результатов показал, что вид прогнозируемых зависимостей изучаемой характеристики от времени существенно зависит от  $\mu$ .

В качестве примера на рис. 5 приведены зависимости от времени фактических среднегодовых значений содержания тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики, а также результатов их моделирования и прогнозирования с использованием модели (1), учитывающей различные наиболее эффективные наборы ее аргументов.

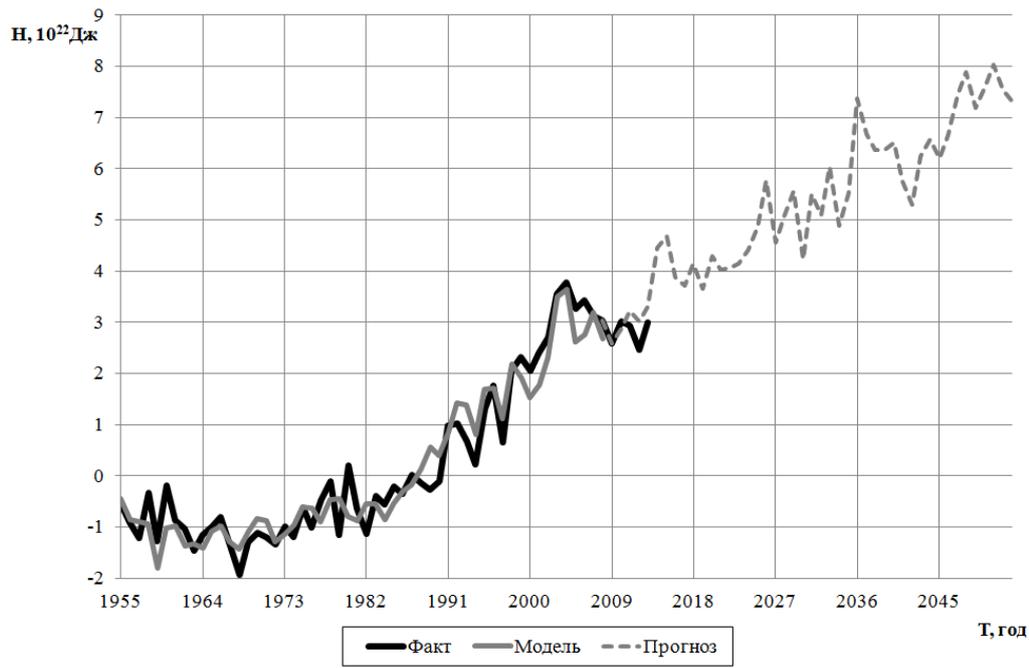


А)  $\mu = 29$

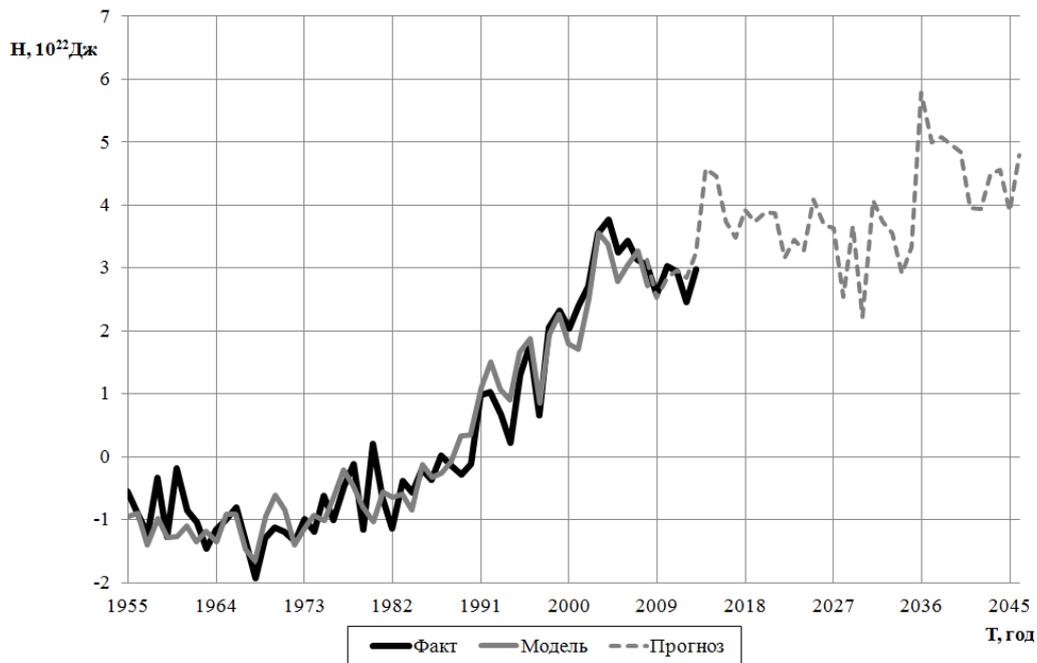


Б)  $\mu = 0$

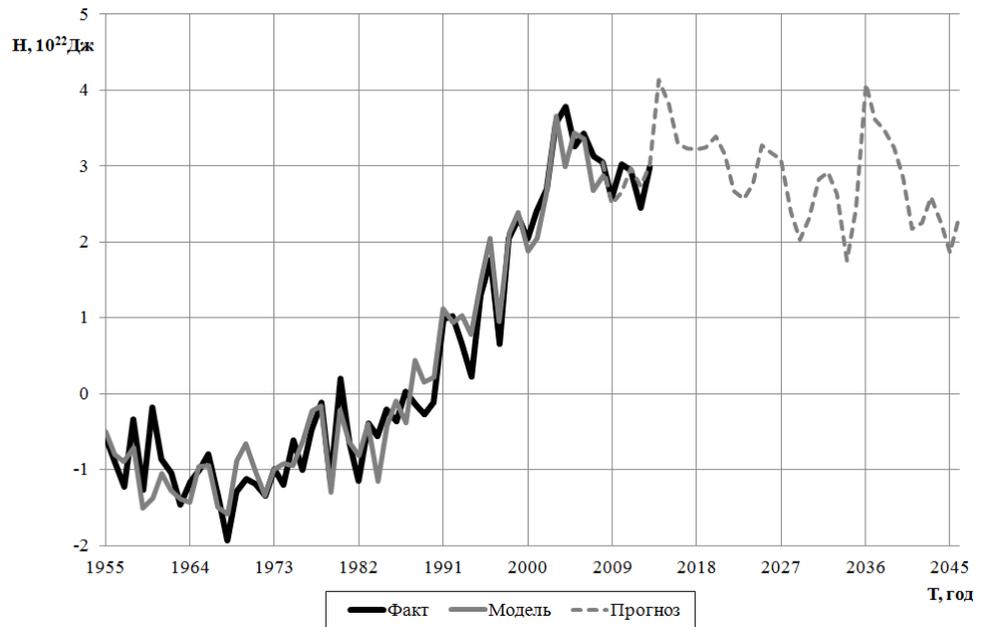
ПРОГНОЗЫ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГОДОВОГО СОДЕРЖАНИЯ ТЕПЛА  
В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ВОД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ...



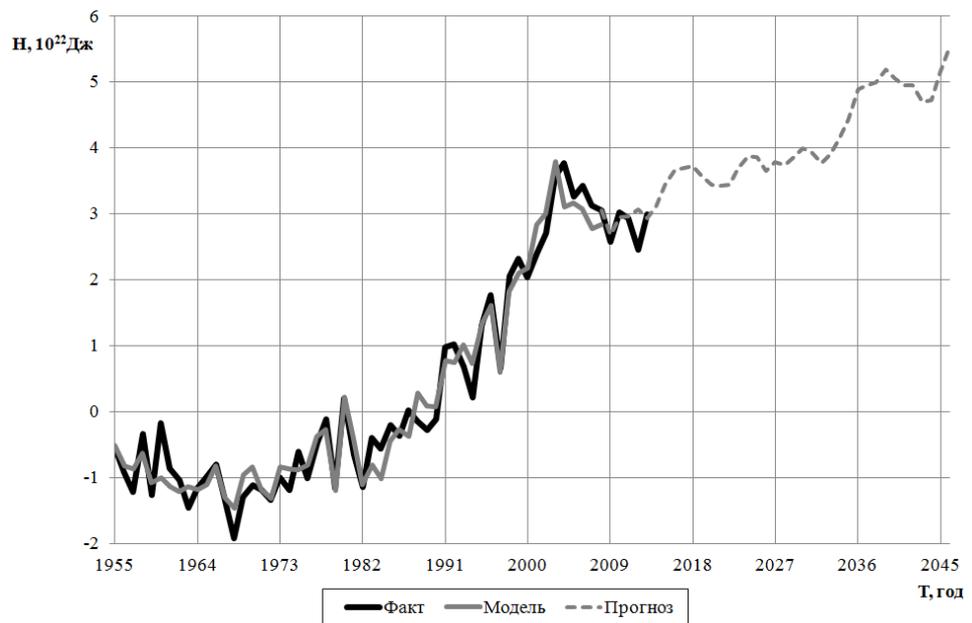
В)  $\mu = 1$



Г)  $\mu = 4$



Д)  $\mu = 10$  (наиболее точная модель)



Е)  $\mu = 16$

Рис. 5. Зависимости от времени фактических среднегодовых значений содержания тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики, а также результатов их моделирования и прогнозирования с использованием модели (1), учитывающей различные ее наиболее эффективные наборы

Из рис. 5А следует, что если верна гипотеза 1, то начавшееся в 2005 г. снижение содержания тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики уже в 2014 г. прекратится. На протяжении всего последующего периода прогнозируемые значения рассматриваемой характеристики будут монотонно увеличиваться.

Рис. 5Б показывает, что в случае адекватности гипотезы 2, характер прогнозируемого процесса в будущем может радикально отличаться от его предыстории. Прогнозируемые значения рассматриваемой характеристики в ближайшее десятилетие будут практически монотонно снижаться до постоянного уровня, а в дальнейшем изменяться по колебательному закону на неизменном уровне. Подобное явление представляется маловероятным, поскольку никаких радикальных изменений закономерностей изучаемого процесса пока не выявлено. К тому же значение максимальной ошибки данного парадоксального прогноза на период 2009-2013 гг. превышает его уровни, соответствующие любым другим наборам аргументов модели (1) (т. е. качество модели по рассматриваемому критерию является наихудшим).

Из рис. 5В видно, что если в набор аргументов модели (1) входит единственный фрагмент ряда концентраций диоксида углерода, прогнозируемым изменениям состояния рассматриваемого процесса будет присуща тенденция к устойчивому росту. Значение максимальной ошибки рассматриваемого прогноза с упреждением 1-5 лет несколько меньше, чем в предыдущем примере, но существенно больше, чем в других случаях.

Рис. 5Г показывает, что использование при прогнозировании наиболее эффективного набора аргументов, содержащего четыре фрагмента ряда концентраций диоксида углерода позволяет получить качественно иной результат. Согласно этому прогнозу, изменения содержания тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики будут носить волнообразный характер. При этом существенный рост значений рассматриваемой характеристики начнется лишь с 2035 г. Тенденция к потеплению рассматриваемого слоя вод Северной Атлантики продолжится до середины XXI в., после чего она сменится на противоположную.

Из рис. 5Д видно, что из прогноза рассматриваемого процесса, который получен при использовании наиболее точной модели (1), с  $\mu = 10$ , следует, что в период до 2046 г. наибольшее содержание тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики будет соответствовать 2014 году. После этого значение этой характеристики будет снижаться волнообразно, с промежутками между максимумами приблизительно равными 11 годам. В минимумах ее значение не будет снижаться до уровней ниже имевших место в начале XXI в., что позволяет предполагать отсутствие каких либо катастрофических климатических либо экологических последствий данного явления.

Тенденции к снижению в период 2014-2046 гг. содержания тепла в рассматриваемом слое Северной Атлантики прогнозируются также при использовании наборов аргументов с  $\mu$  от 9 до 14, но наиболее быстрое уменьшение данной характеристики соответствует набору с  $\mu = 10$ .

Из рис. 5Е следует, что при  $\mu = 16$  прогнозируемая на период 2014-2046 гг. тенденция изменения содержания тепла в изучаемом слое Северной Атлантики является возрастающей. Аналогичный результат прогнозирования соответствует использованию в модели (1) любых наиболее эффективных наборов аргументов с  $\mu$ , превышающими 16.

Сопоставление прогнозов, которые построены с использованием модели (1) и различных наборов ее аргументов, показывает, что при любом соотношении между учитываемыми глобальными факторами, катастрофического уменьшения содержания тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики в первой половине XXI в. не произойдет.

Какой бы из разработанных прогнозов не оказался адекватным, минимальные уровни рассматриваемой характеристики не снизятся ниже значений имевших место в начале XXI в. Если адекватными окажутся прогнозы, которым соответствуют наборы аргументов с  $\mu$  от 9 до 14, максимальные прогнозируемые ее уровни в период 2014-2046 гг. не превысят значения, соответствующего 2014 г. (который мы относительно благополучно почти пережили).

Нечто подобное по всей видимости действительно осуществится, при условии, что каких либо неожиданных катастрофических изменений рассматриваемых закономерностей на нашей планете или на Солнце в первой половине XXI в. не случится.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, установлено:

1. Статистические связи изменений среднегодовых содержаний тепла в верхнем 700-метровом слое вод Северной Атлантики с фрагментами предыстории солнечной активности являются значимыми, при условии, что последние опережают их по времени на 45-64 года, 155-167, а также 184-198 лет (что может быть объяснено наличием достоверной корреляции между соответствующими фрагментами ряда чисел Вольфа).

2. Изучаемый процесс значимо статистически связан с любыми фрагментами предыстории изменений концентрации в тропосфере диоксида углерода, кроме опережающих его на 156-167 лет.

3. Выявленные статистические связи изучаемого процесса и указанных факторов обладают устойчивостью к временным сдвигам соответствующих временных рядов, что обуславливает целесообразность их учета при его прогнозировании.

4. Наибольшая точность прогнозов этого процесса с упреждениями 1-5 лет, формируемых с использованием множественно-регрессионной модели (1), достигается при условии, что учитываемый в ней набор аргументов является наиболее эффективным и включает 10 выявленных фрагментов временных рядов среднегодовых концентраций в тропосфере диоксида углерода.

В целом полученные результаты соответствуют современным представлениям о последствиях усиления парникового эффекта в земной атмосфере, а также

## ПРОГНОЗЫ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГОДОВОГО СОДЕРЖАНИЯ ТЕПЛА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ВОД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ...

влиянии на него солнечной активности. Они свидетельствуют об актуальности выявления причинных механизмов, обуславливающих установленные связи.

### Список литературы

1. Степанов В. Н. Океаносфера. — М.: Мысль, 1983. — 270 с.
2. Лаппо С. С. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан – атмосфера и энергоактивные области мирового океана / С. С. Лаппо, С. К. Гулев, А. Е. Рождественский. – Л. : Гирометеоиздат, 1990. – 334 с.
3. Бурков В.А. Общая циркуляция Мирового океана. Л. : Гирометеоиздат, 1980, 254 с.
4. Шулейкин В.В. Физика моря / В.В.Шулейкин. – М. : Наука, 1968. – 1083 с.
5. Climate Change 2007 – Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to Assessment Report Four of the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). Cambridge University Press.- Cambridge. UK, 2007.- 973p.
6. Боголепов М.А. Возмущения климата и жизнь земли и народов/М.А.Боголепов. Берлин. -1923. - 24с..
7. Марков К.К. О связи между изменениями солнечной активности и климата Земли./К. К. Марков//Вопросы географии. –М. 1949. -№12. –С46-72.
8. Предтеченский П.П. Цикличность в колебаниях солнечной деятельности/ П. П. Предтеченский// Труды ГГО. -1948. –Вып.8. –С70.
9. Шнитников А. В. Изменчивость солнечной активности за историческую эпоху на основе некоторых ее земных проявлений/А. В. Шнитников//Бюллетень комиссии по исследованию Солнца. – 1951. -№7.
10. Эйгенсон М.С. Очерки физико-географических проявлений солнечной активности./М.С. Эйгенсон// Львов.- 1957. -252с.
11. Eddy J.A. The Maunder Minimum/ J.A. Eddy//Science. – 1976. -192. –P.1189-1202.
12. Борисенков Е.П. Колебания климата за последнее тысячелетие. Л. Гирометеоиздат. -1988. -275с.
13. Абдулсаматов Х. И. Солнце диктует климат Земли. Санкт Петербург. Логос. -2009. -197с.
14. Моханакумар К. Взаимодействие стратосферы и тропосферы/ К. Моханакумар. Перевод с английского Р.Ю. Лукьяновой, под ред. Г.В.Алексеева.// Москва. – ФИЗМАТЛИТ. - 2011. -451с
15. Kodera K. Solar influence on the Indian Ocean monsoon through dynamical processes/ K. Kodera// Grophys. Res. Lett. – 2004. – 31.
16. Baldwin M.P. The solar cycle and stratosphere-troposphere dynamical coupling. / M.P. Baldwin, T. J. Dunkerton // J. Atmos. Solsr Terr. Phys. – 2005. -67. –P. 71-82.
17. Гинзбург В. Л. Космические лучи: 75 лет исследований и перспективы на будущее / В. Л. Гинзбург // Земля и Вселенная. – М.: Наука, 1988. - № 3. – С. 3 – 9
18. Монин А. С. Климат как проблема физики. М. Наука. – 1969. -184с.
19. Полонский А. Б. Роль океана в изменениях климата. Киев. Наукова думка. – 2008. – 184с.
20. Айвазян С.А., Мхитарян В. С. Прикладная статистика и основы эконометрики. Юнити, 1998, 1022 стр.
21. [http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M\\_HEAT\\_CONTENT/basin\\_data.html](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT/basin_data.html)
22. <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb.html>
23. <http://www.gao.spb.ru/database/esai.html>
24. Ван Трисс Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Обработка сигналов в радио- и гидролокации / Г.Ван Трисс; под ред. Горяинова В.Т. – М. : Сов. радио, 1975. – Т. 3. – 740 с.

**Холопцев А. В. Прогнози змін середньорічного вмісту тепла у верхньому шарі вод Північної Атлантики з урахуванням впливу глобальних чинників / А. В. Холопцев, М. П. Никифорова // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Географічні науки. – 2014. – Т.27 (66), №2. – С. 195-215.**

Вивчено можливості прогнозування змін середньорічного вмісту тепла у верхньому 700-метровому шарі вод Північної Атлантики з урахуванням впливу на них передісторії варіацій сонячної активності, а також концентрації в тропосфері діоксиду вуглецю. Зіставлені прогнози всіх можливих наборів цих

факторів. Це дозволило виявити набір таких факторів, облік яких в якості аргументів прогностичної моделі досліджуваного процесу забезпечує мінімальний рівень максимальних помилок прогнозування з упреждениями 1- 5 років. Розроблені прогнози найбільш реалістичні, точні, і здійсняться у майбутньому, за умови, що закономірності, які обумовлюють статистическе зв'язку досліджуваного процесу і його глобальних чинників, не зміняться.

**Ключові слова:** зміст тепла у верхньому 700-метровому шарі Північної Атлантики, сонячна активність, концентрація діоксиду вуглецю, прогноз, множинно-регресійна модель.

**FORECASTING OF MEAN ANNUAL HEAT CONTENT CHANGES  
IN NORTH ATLANTICS UPPER LAYER  
HAVING REGARD TO GLOBAL FACTORS INFLUENCE**

*Kholoptsev A.V.<sup>1</sup>, Nikiforova M.P.<sup>2</sup>*

*1 – Sevastopol Marine Academy, Sevastopl, Russian Federation;*

*2 – Sevastopol National Technical University, Sevastopol, Russian Federation*

*E-mail: maha.ukraine@gmail.com*

Forecasting possibilities of annual mean heat content changes in upper 700 m layer of North Atlantics were studied with regard to influence of sun activity prehistory variations and CO<sub>2</sub> tropospheric concentration. For prediction a linear multiple regression model with 29 factors was used. It connected studied process changes with prehistory fragments of named global factors, which statistical connections were the most powerful and steady. Forecasts with all possible sets of such factors were compared. It allowed to establish a set of such factors, which consideration as forecasting model arguments, secures minimal levels of maximum prediction errors with 1-5 years advancing.

Forecasts features, developed with regard to this one and all other arguments sets of the model, were analyzed. It was determined, that decrease of annual mean heat content in upper 700 m layer of North Atlantics, which began after 2004 yr, would stop and change its phase on opposite in 2014-2016 yrs.

It was established, that prehistory of CO<sub>2</sub> tropospheric concentration changes and sun activity variations were statistically significant factors of studied process under determined time shifts. Statistical relations between them have steadiness to time shifts of corresponding time series. This provides robustness of forecasting multiple regression models of studied process, considering them as arguments.

Developed forecasts are the most realistic, accurate and will be realized in future, under condition that regularities, which cause statistical connections of studied process and its global factors, will not change.

**Keywords:** heat content in upper 700 m layer of North Atlantics, sun activity, CO<sub>2</sub> concentration, forecast, multiple regression model.

**References**

1. Stepanov V.N. Oceansphere. – M.: Mysl, 1983. – 270 p.
2. Lappo S.S. Large-scale heat interaction in ocean – atmosphere system and energy active regions of Global ocean / S.S. Lappo, S.K. Gulyaev, A.E. Rozhdestvenskiy. – L.: Hydrometeoizdat, 1990. – 334 p.
3. Burkov V.A. General circulation of Global ocean. – L.: Hydrometeoizdat, 1980. – 254 p.

**ПРОГНОЗЫ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГОДОВОГО СОДЕРЖАНИЯ ТЕПЛА  
В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ВОД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ...**

---

4. Shuleikin V.V. Physics of the sea / V.V. Shuleikin. – M.: Nauka, 1968. – 1083 p.
5. Climate Change 2007 – Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to Assessment Report Four of the Intergovernmental Panes of Climate Change (IPCC). Cambridge University Press. – Cambridge. UK, 2007. – 973 p.
6. Bogolepov M.A. Climate disturbances and life of Earth and the peoples / M.A. Bogolepov. – Berlin, 1923. – 24 p.
7. Markov K.K. On the connection between sun activity changes and Earth climate / K.K. Markov // Geography questions. – M., 1949. - №12. – P. 46 – 72
8. Predtechenskiy P.P. Cyclicity in sun activity oscillations / P.P. Predtechinskiy // GGO works. – 1948. – Vol. 8. – P. 70
9. Shnitnikov A.V. Sun activity changeability in historical epoch on the basis of some its earth displays / A.V. Shnitnikov // Bulletin of commission on Sun research. – 1951. - №7
10. Eigenson M.S. Essays of physic-geographical displays of sun activity / M.S. Eigenson // Lvov. – 1957. – 252 p.
11. Eddy J.A. The Maunder Minumum/ J.A. Eddy//Science. – 1976. – 192. – P. 1189 – 1202
12. Borisenkov E.P. Climate oscillations in last millennium. – L.: Hydrometeoizdat. – 1988. – 275 p.
13. Abdulsamatov H.I. Sun dictates Earth climate. – Saint-Petersburg.: Logos. – 2009. – 197 p.
14. Mohanakumar K. Interaction of stratosphere and troposphere / K. Mohanakumar. Translation from English R.U. Lukianova, under redaction by G.V. Alekseev. – M.: Physmatlit. – 2011. – 451 p.
15. Kodera K. Solar influence on the Indian Ocean monsoon through dynamical processes/ K. Kodera// Grophys. Res. Lett. – 2004. – 31.
16. Baldwin M.P. The solar cycle and stratosphere-troposphere dynamical coupling. / M.P. Baldwin, T. J. Dunkerton // J. Atmos. Solsr Terr. Phys. – 2005. -67. –P. 71-82.
17. Ginzbourg V.L. Cosmic rays: 75 years of researches and perspectives on future / V.L. Ginzbourg // Earth and Universe. – M.: Science, 1988. – No.3. – P. 3 – 9
18. Monin A.S. Climate as a problem of physics. – M.: Science. – 1969. – 184 p.
19. Polonskiy A.B. Role of ocean in climate changes. – Kiev: Naukova dumka.- 2008. – 184 p.
20. Aivazyan S.A., Mhitaryan V.S. Applied statistics and econometry basics. – Unity. – 1998. – 1022 p.
21. [http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M\\_HEAT\\_CONTENT/basin\\_data.html](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT/basin_data.html)
22. <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb.html>
23. <http://www.gao.spb.ru/database/esai.html>
24. Van Triss G. Theory of disclosure, estimation and modulation. Processing of signals in radio- and hydrolocation / G. Var Triss under redaction by Goryainov V.T. – M.: Sov.radio, 1975. – Vol. 3. – 740 p.

*Поступила в редакцию 20.11.2014 г.*