
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

**КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВАЖНЕЙШИХ ФАКТОРОВ
НА ИЗМЕНЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА В ПОСЛЕДНИЕ 150 ЛЕТ**

©2019 г. О. М. Покровский

*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
E-mail: pokrov_06@rambler.ru*

Поступила в редакцию 15.12.2018 г.

Предложено использование множественной регрессии для создания статистической модели описания климатических изменений под влиянием заданных климатообразующих факторов. Эта модель обеспечивает не только оценки временной эволюции глобальной температуры, но также и совокупность соответствующих доверительных интервалов с высоким уровнем статистической значимости (вероятности). Исключение линейного тренда климатических рядов температуры (CRUTEM) и концентрации CO₂ в атмосфере позволяет объективно и количественно оценить влияние естественных факторов на изменение климата. Глобальная температура CRUTEM квазисинхронно реагирует на колебания средней температуры поверхности северной Атлантики (индекс АМО), но с запаздыванием около 15 лет — на изменения солнечной активности (числа Вольфа). Линейный тренд роста концентрации CO₂ в атмосфере покрывает практически всю межгодовую изменчивость и отражает линейный тренд глобальной температуры, но составляет лишь определенную часть межгодовой изменчивости.

Ключевые слова: изменение климата, статистические климатические модели, оценки факторов изменения климата, климатическая регрессионная модель

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201933-12>

ВВЕДЕНИЕ

Проблема глобального потепления получила основное обоснование благодаря росту годовых значений приземной температуры воздуха, осредненной по земному шару в последней четверти XX века. Мультидекадные (мультидесятилетние) переходы от похолодания к потеплению наблюдались за весь период инструментальных наблюдений (Courtillot et al., 2013), который к настоящему времени берет отсчет с 1850 г. (Brohan P. et al., 2006). Такие колебания квалифицируются как 60–80-летние квазипериодические осцилляции, имеющие естественную природу. Естественные колебания климата и их связь с осцилляциями температуры океана и площади ледового покрова изучались, в частности, в цикле работ (Покровский, 2003; 2005а; 2005б; 2007; 2010), где привлекались не только обычные, но и данные спутниковых измерений.

Климатологи, объединившиеся в Межправительственную группу экспертов по изменению климата (МГЭИК), утверждают, что основной вклад в потепление вносит увеличение концентрации углекислого газа. Гипотеза антропогенного глобального потепления основана на

соответствующих модельных расчетах с антропогенным форсингом. Поэтому не удивительно, что сценарии будущих изменений климата, основанные на модельных расчетах, показывают, что глобальная температура, в основном, монотонно возрастает, следуя за увеличением концентрации углекислого газа (IPCC, 2018). Результаты недавней работы (Palmer et al., 2018) лишней раз подтверждают неспособность всех 90 моделей, разработанных в рамках проекта CMIP 5 (IPCC, 2013) воспроизводить естественные колебания глобального климата.

Начиная с 2000 г. наступила «пауза» в потеплении (Parker A., 2013), которую не удалось воспроизвести с помощью моделей, что вновь поставило вопрос о возможном влиянии на изменение климата других факторов, которые ранее рассматривались сторонниками МГЭИК как малозначимые. Основная теоретическая база климатологов МГЭИК основывалась на результатах численного моделирования. Его главная роль определялась возможностями прогнозирования будущих изменений климата. Однако отсутствие подходящего описания «климатической паузы» за два десятилетия (Parker A., 2013), прошедших после сильнейшего Эль-Ниньо в 1998 г., поставило

под вопрос надежность климатических моделей (Christy et al., 2010), особенно в тропосфере, где расхождения с результатами наблюдений, полученных с помощью радиозондов и метеорологических спутников, были особенно заметными (Douglass et al., 2008). Любопытно, что Парижская конференция по климату была собрана именно в год, следующий за заранее прогнозируемым максимальным явлением Эль-Ниньо в 2015–2016 гг. С одной стороны, этот феномен привел к временному росту температуры и являлся аргументом в поддержку теории МГЭИК. С другой стороны, указанное колебание температуры не было обнаружено в климатических модельных сценариях, например, CMIP 5 (IPCC, 2018).

Таким образом, включение естественных факторов изменения климата (морские течения, солнечная радиация, облачность и др.) в климатические модели пока не дает ожидаемых результатов при сравнении с результатами наблюдений. На наш взгляд, причина этого состоит в недостаточно корректном учете влияния океанических течений, формирующих температурный фон на поверхности океанов из-за недостатка знаний и информации о глубинных ветвях океанических течений. Это же относится и к другим факторам: солнечной активности, галактического излучения, облачности, физики, химии и биологии глубокого океана, взаимодействия атмосферы и океана, и др.

Колебания температуры воздуха в Европе и, особенно, в северной Евразии (Pokrovsky, 2009) в значительной мере определяются изменениями температуры поверхности океана (ТПО) в северной Атлантике (Wallace et al., 1996). Это же относится и к Арктике (Фролов и др., 2010; Pokrovsky, 2010). Поэтому возникает необходимость в разработке альтернативных подходов, где будут использоваться не приближенные параметрические схемы описания влияния этих факторов, но в большей степени фактические данные наблюдений.

Критики теории глобального потепления МГЭИК часто указывают, что из-за стохастической природы климатообразующих процессов не существует принципиальной возможности их прогнозирования с помощью классических гидротермодинамических уравнений. При этом некоторые ссылаются на двухнедельный предел предсказуемости метеорологических полей, доказанный еще Лоренцем (Lorenz, 1969). Конечно, климатические модели оперируют с осредненными месячными полями. Тем не менее, обширный опыт климатического моделирования

не дает обнадеживающих результатов в плане прогнозирования соответствующих тенденций за исключением долгопериодных линейных трендов. Поэтому представляется целесообразным начать разработку вероятностных и статистических подходов. В отличие от гидротермодинамических уравнений вероятностные модели не только являются более гибким прогностическим инструментарием, но также имеют способность к самообучению на основе анализа накопленных многолетних архивов данных.

Впервые попытка провести статистический анализ факторов климатических изменений в связи с проблемой глобального потепления была предпринята в работе (Tett et al., 1999). Авторы, используя только данные для двух внешних естественных (солнечная активность и стратосферный аэрозоль) и двух внутренних антропогенных (парниковые газы и сульфатный аэрозоль) факторов изменения климата с разрешением 10 лет на основе регрессионной модели, адаптированной к климатической модели HadCM3, пришли к следующим выводам:

1) изменения глобальной температуры не может быть объяснено только естественными причинами,

2) потепление на 0.25 К определяется увеличением концентрации парниковых газов,

3) вклад изменения приходящей солнечной радиации может составлять 0.125 К.

Авторы указывают, что при их подходе статистическая модель оказывается нечувствительной к факторам взаимодействия атмосферы и океана и ее выводы целиком зависят от эффективности используемой климатической модели, ответственной за описание этих процессов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

К настоящему времени сформированы проверенные и верифицированные ряды основных климатообразующих параметров за период, начиная с 1850 г. Они представлены на сайтах метеорологических служб США и Великобритании. Уточненные ряды глобальной температуры воздуха CRUTEM даны на сайте климатического центра MetOffice (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>) и описаны в работе (Brohan et al., 2006).

Колебания температуры воздуха в Европе и, особенно, в северной Евразии (Pokrovsky, 2009) в значительной мере определяются изменениями температуры поверхности океана (ТПО) в северной Атлантике (Wallace et al., 1996). Это же относится

и к Арктике (Фролов и др., 2010; Pokrovsky, 2010). Ряды среднегодовых значений ТПО в северной Атлантике описаны в (Enfield et al., 2001) как мультideкадный индекс (Atlantic multidecadal oscillation, АМО). Соответствующие значения представлены на нескольких сайтах, например, в (АМО, 2018) и анализированы в (Rayner et al., 2006).

Солнечная активность, подчиняясь 11-летнему циклу, демонстрировала постепенное возрастания, начиная с малого ледникового периода. Бельгийский центр данных по солнечной активности располагает массивом месячных значений за период, начиная с 1740 г. (Sunspot Index. Monthly sunspot numbers, 2018). Результаты пересчета данных солнечной активности (числа Вольфа) в энергетические единицы представлены в работах (Lean et al., 1995; Lean et al., 1998; Lean, 2000).

Длинные ряды концентрации углекислого газа в атмосфере также имеются на многих порталах. Например, (Historical CO2 data, 2018). Анализ данных приведен в работе (Etheridge et al., 1996).

АППРОКСИМАЦИЯ ВРЕМЕННОГО ХОДА ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рассмотрим задачу представления исследуемого ряда глобальной температуры в виде линейной комбинации соответствующих рядов основных климатообразующих факторов с учетом опережения или запаздывания фаз. Поскольку исходные ряды являются нестационарными (для проверки использовался тест Дики–Фуллера (Dickey and Fuller, 1979)), сначала были исключены соответствующие линейные тренды и впоследствии мы работали с рядами, имеющими нулевой временной тренд. Учитывая дискретный характер рядов глобальной температуры и других климатообразующих факторов, для решения этой задачи появилась возможность использования стандартной процедуры множественной регрессии. Напомним ее основные положения (см., например, (Ферстер и Ренц, 1983)).

Модель множественной линейной регрессии с k переменными-предикторами X_1, X_2, \dots, X_k и прогнозируемой переменной Y , может быть записана как

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon. \quad (1)$$

Жирным шрифтом в (1) обозначаются векторы-столбцы. Здесь β_j ($j = 1, \dots, k$; k — число влияющих факторов) — неизвестные коэффициенты частичной регрессии. Можно считать, что β_j — j -ый факторный коэффициент в модели (1). Он описывает изменение в математическом ожидании прогнозируемой переменной $E(y)$, связанное

с увеличением на одну условную единицу компонент вектора X_j ($j = 1, \dots, k$) в предположении, что все другие факторы сохраняют постоянные значения. Вектор постоянных величин β_0 образован из значений математических ожиданий компонент вектора $E(y)$. По существу, это ожидаемое значение y , когда все рассматриваемые факторы X равны 0. Вектор ε образован из случайных величин ε_i ($i = 1, \dots, n$), каждая из которых описывает отклонение значения y_i от среднего значения данного распределения X_{ij} ($j = 1, \dots, k$). Эта случайная величина может быть рассмотрена как описывающая суммарное воздействие на y_i ($i = 1, \dots, n$; n — число временных отсчетов) таких неизвестных факторов, которые явно не включены в уравнение (1). Обычно ε_i называется остаточным членом или просто остатком регрессии.

Объединяя вектора в матрицы, а скаляры в вектора, в соответствии с известной стандартной схемой, приходим к векторно-матричному уравнению

$$y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (2),$$

в котором по данным наблюдений y и заданной матрице факторов X необходимо найти неизвестные факторные коэффициенты β и определить ковариационную матрицу вектора остатков ε .

Для решения этой задачи будем использовать аппарат множественной линейной регрессии. Решение (2) описывается стандартным нормальным уравнением и выглядит следующим образом:

$$b = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y; \quad (\text{T-знак транспонирования}) \quad (3)$$

Ковариационные матрицы векторов оценки b (3) b и остатков ε в (2) имеют, соответственно, вид:

$$S_b = (X^T \cdot X)^{-1} S_\varepsilon = X \cdot (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T. \quad (4)$$

Основываясь на (3) и (4), можно вычислить стандартные статистические характеристики регрессионного уравнения (2). Речь идет об общей сумме квадратов (SST), сумме квадратов регрессии (SSR) и сумме квадратов ошибок регрессии (SSE), также известной как сумма квадратов остатков регрессии. Множественный коэффициент корреляции $R^2 = SSR/SST$ используется в выражении для статистики Фишера

$$F = R^2(n - k - 1)/(1 - R^2) k,$$

которая характеризует способность модели (1) играть роль прогностического средства.

Стандартная ошибка s_ε оценки компонент вектора y показывает, насколько существенно наблюдения y отклоняются от прогнозируемых значений, полученных в рамках регрессии. Если компоненты

вектора остатков регрессии $\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$, то около 68.3% наблюдений должны находиться в пределах $\pm \sigma_\varepsilon$ — единицы регрессионной линии (т.е. σ_ε), 95.4% — должны находиться в пределах $\pm 2 \sigma_\varepsilon$, т.е. двух единиц, а 99.7% — должны находиться в пределах $\pm 3 \sigma_\varepsilon$, т.е. трех единиц. При этом для оценки σ_ε используется формула $s_\varepsilon^2 = SSE / (n - k - 1)$.

Для расчета доверительных интервалов приближенных значений компонентов вектора y , получаемых с помощью модели (1), нам потребуются Т-статистика Стьюдента для $n - k - 1$ степеней свободы, которая здесь имеет вид $T_{n-k-1} = b_j / s_{bj}$. При этом используются компоненты с номером j из формул (3) и (4). В результате приходим к выражению для доверительного интервала оценивания β_j ($j = 1, \dots, k$). Неизвестная величина β_j с вероятностью $(1 - \alpha)$ находится внутри интервала

$$b_j - (t_{\alpha/2} \cdot s_{bj}) \leq \beta_j \leq b_j + (t_{\alpha/2} \cdot s_{bj}). \quad (5)$$

В (5) $t_{\alpha/2}$ — табличные значения Т-статистики Стьюдента с $n - k - 1$ степенями свободы.

Используя (5), без труда переходим к доверительным интервалам для y_j ($j = 1, \dots, n$).

Предложенный подход позволяет получить также и формулы для прогнозирования процесса в следующей отсчет времени: y_{n+1} при наличии $x_{n+1,1}, \dots, x_{n+1,n}$, включая прогностические значения и доверительные интервалы. Существующие климатические модели, основанные на моделях общей циркуляции атмосферы, не позволяют получить достоверные оценки погрешностей полученных климатических сценариев. Частично эта проблема решается с помощью ансамблевых прогнозов. Важное достоинство предлагаемого подхода состоит в том, что в нем удается преодолеть указанный недостаток.

Анализируя изложенный метод, следует отметить, что, как это часто бывает, имеются определенные трудности для его практической реализации. Дело в том, что эффективность оценок (3) и (4) зависит в значительной мере от индекса обусловленности матрицы Грамма $X^T \cdot X$, который в свою очередь определяется соотношением минимального и максимального собственного числа этой матрицы. Известно, что индекс обусловленности матрицы Грамма в основном зависит от степени линейной зависимости образующих векторов. В нашем случае это векторы X_j ($j=1, \dots, k$), описывающие временной ход рассматриваемых климатообразующих факторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

В своем исследовании мы исходили из того, что изменения климата происходят под влиянием

нескольких взаимосвязанных факторов, определяемых временной эволюцией процессов, которые протекают в определенной физической логике. Основным источником энергии на Земле является солнечная радиация, часть которой поглощается и рассеивается в атмосфере, другая часть поглощается на поверхности и отражается ею. Большая часть солнечной энергии, поглощаемой поверхностью Земли, относится к тропической зоне, где в основном сосредоточены акватории океанов. Это означает, что большая часть этой компоненты приходящей солнечной энергии идет на нагрев морской поверхности. Этот нагрев запускает множество морских течений в океанах, которые образуют не только поверхностные, но и глубоководные ветви. Из-за недостаточности информации о морских течениях мы слабо осведомлены о том, как перераспределяется солнечная энергия в акватории океанов. Наиболее известный феномен Эль-Ниньо относится к таким мало предсказуемым явлениям морских течений, которые выходят из морских глубин на поверхность.

В 1984 г. российский и американский ученые (Сергей Лаппо и Стефан Хастенрас), обобщив результаты исследований физико-химических свойств вод в океанах, предложили механизм, так называемой, глобальной меж океанской циркуляции. В это же время, статья Сергея Лаппо «К вопросу о причинах адвекции тепла на север через экватор в Атлантическом океане» была отвергнута многими советскими научными журналами. Она была опубликована в 1984 г. в ведомственном сборнике института океанологии АН СССР.

Последовавшая теория «глобального океанического конвейера» (ГОК) Уоллеса Брокера (Broecker, 1985) в определенной мере объясняет некоторые особенности морских течений и их взаимосвязь. Эта и другие работы отмечали роль океанических течений в изменениях климата, имея в виду, что теплоемкость воды, примерно, в тысячу раз больше теплоемкости атмосферного воздуха. Поэтому даже незначительные изменения температуры поверхности океана (ТПО) заметно влияют на изменения температуры атмосферного воздуха (ТАВ), регулирует появление или разрушение ячеек атмосферной циркуляции, включая циклоны и антициклоны.

В работах Брокера и его последователей были получены другие важные результаты. В них впервые была предпринята попытка оценить временные лаги (фазы запаздывания) аномалий ТПО в Индийском и Атлантическом океанах по отношению к начальным возмущениям ТПО в тропической зоне Тихого океана. При этом учитывалось

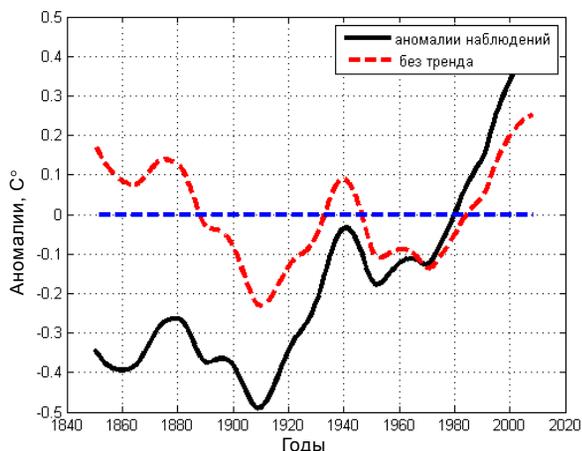


Рис. 1. Аномалии глобальной температуры атмосферного воздуха (CRUTEM v.3) с 1856 г. (1 — исходный ряд, 2 — с исключением линейного тренда).

направление основного русла течения глобального конвейера (ГК) с востока на запад и от экватора к полюсам. Эффективные фазы запаздывания при фактической средней скорости поверхностного течения составляют для Индийского океана несколько лет, а для северной Атлантики — около 15–17 лет. Примерно 8–10-летняя фаза запаздывания ГК характерна для ветви, огибающей по направлению часовой стрелки бассейн северной части Тихого океана вдоль азиатских, а затем и североамериканских берегов.

Следует учитывать неравномерность покрытия климатическими данными не только территории поверхности суши, но даже и северного полушария. Основная часть метеорологических станций, функционировавших за последние полтора столетия, расположена на территории западной Европы и восточного побережья США. С учетом этих реалий при оценке рядов CRUTEM и NOAA, нас должна интересовать средняя ТПО в северной Атлантике, характеризуемая индексом АМО. При этом наиболее чувствительной к изменениям солнечной активности является тропическая зона Тихого океана вследствие максимума площади экспозиции для солнечной радиации. Но бассейн Тихого океана не обеспечен достаточными по продолжительности климатическими рядами. Поэтому, в рамках нашего исследования целесообразно рассмотреть варианты запаздывания (влияния) фазы изменения солнечной активности по отношению к ТАВ. Нами рассмотрено 4 варианта: 0, 5, 10, и 15 лет. В число влияющих факторов на описание ТАВ за 150 лет нами были включены не только 4 варианта рядов солнечной активности, но также и ряды концентрации углекислого газа и значений индекса АМО.

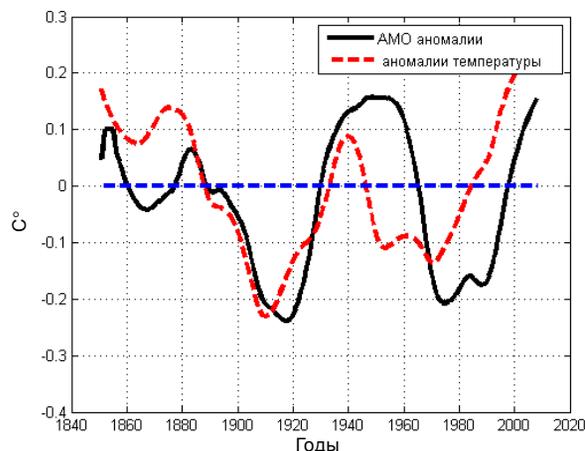


Рис. 2. Когерентность аномалий глобальной температуры атмосферного воздуха (CRUTEM v.3) с исключенным трендом и атлантического мультideкадного колебания (АМО) с 1856 г.

По правилам статистического анализа к исходным нестационарным рядам данных была применена процедура исключения линейного тренда. Таким образом, условия применения регрессионной модели (1), (2) были полностью выполнены. Кроме того, для исключения климатического шума и с целью повышения индекса обусловленности матрицы Грамма $X^T \cdot X$ было проведено сглаживание данных согласно авторской методике, описанной в работах (Pokrovsky, 2009, 2010). Для примера на рис. 1 представлены результаты сглаживания и исключения линейного тренда ТАВ CRUTEM. В результате обнаруживаются естественные колебания ТАВ с квазипериодичностью около 60–70 лет. Этот результат был подтвержден ранее также графиком автокорреляционной функции и картой вейвлет анализа (Pokrovsky, 2009, 2010).

Совместный анализ ТАВ CRUTEM и АМО (рис. 2) демонстрирует согласованность фаз колебаний соответствующих климатических индексов. Небольшие расхождения начинают нарастать с момента окончания Второй мировой войны, когда начала развиваться наземная сеть в Азии и других районах мира, подверженных влиянию колебаний ТПО Тихого океана, которые сдвинуты по фазе на несколько лет по отношению к АМО (Pokrovsky, 2009, 2010).

В схеме регрессионного анализа (1)–(5) использовались следующие переменные:

— прогнозируемая величина y — ТАВ CRUTEM, предикторы — АМО, CO_2 (исходный ряд и ряд с исключением линейного тренда) наборы рядов солнечной активности с опережением на 0, 5, 10 и 15 лет соответственно. Проведенные эксперименты с разными вариантами исходных

данных показали, что только после исключения линейных трендов рядов ТАВ CRUTEM и CO₂ оценки получают эффективными с точки зрения статистики.

В табл. 1, 2 показаны результаты корреляционного анализа прогностической величины ТАВ и основными климатообразующими факторами до и после исключения линейных трендов. Эти данные дают представление о вкладе различных факторов в изменение глобальной величины ТАВ.

Таблица 1. Коэффициенты взаимной корреляции между глобальной температурой CRUTEM 3 и климатообразующими факторами

Коэффициенты кросс-корреляции глобальной температуры CRUTEM (%)			
АМО	CO ₂	Солнечная активность	Солнечная активность со сдвигом на 15 лет
21	94	50	65

Таблица 2. Коэффициенты взаимной корреляции между глобальной температурой CRUTEM после исключения линейного тренда и климатообразующими факторами

Коэффициенты кросс-корреляции глобальной температуры CRU после исключения линейного тренда (%)			
АМО	CO ₂	Солнечная активность	Солнечная активность со сдвигом на 15 лет
51	26	0.7	31

Использование статистически необработанных данных выявляет очевидное доминирование вклада CO₂ (табл. 1). Тем не менее, роль солнечной активности остается весьма существенной и колеблется в интервале от 50 до 65% при скромном вкладе северной Атлантики (21%). Однако следует понимать, что применение регрессионной модели к нестационарным рядам является некорректным подходом. Поэтому после исключения линейных трендов соотношение коэффициентов взаимной корреляции кардинально изменилось (табл. 2). На первое место выходит индекс АМО, характеризующий вклад морских течений в северной Атлантике (51%). За ним следует солнечная активность с опережением на 15 лет (31%). Роль CO₂ снижается до 26%. Любопытно, что синхронный (без сдвигов по времени) ряд солнечной активности дает результат близкий к нулю. Это объясняет неудачи

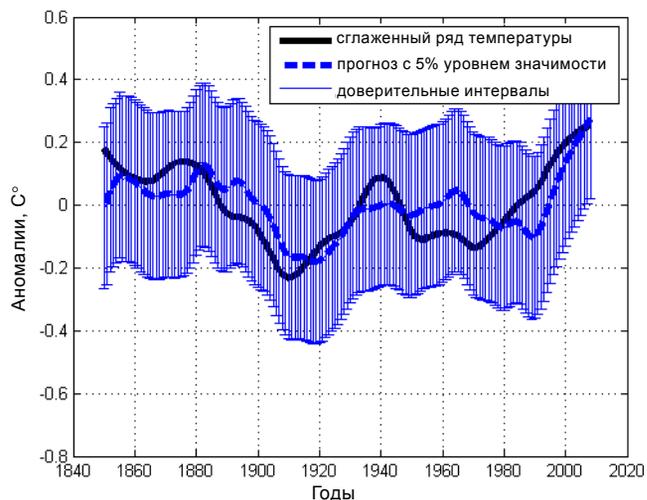


Рис. 3. Сравнение аномалий глобальной температуры атмосферного воздуха (CRUTEM v.3) с исключенным трендом и соответствующих результатов прогнозирования с помощью регрессионной модели в сочетании с доверительными интервалами, соответствующими 5%-му уровню статистической значимости.

в экспериментах с моделями, где солнечная активность менялась в соответствии с фактическими (синхронизированными) данными.

Основной вывод этой части работы заключается в том, что наряду с очевидным согласованным ростом глобальной ТАВ и CO₂ обнаруживается ранее недооцененный вклад изменений солнечной активности и ТПО в северной Атлантике. Рис. 2 демонстрирует тот факт, что именно АМО в определенной мере воспроизводит квазипериодические колебания ТАВ на протяжении последних 150 лет после исключения линейного тренда. Перейдем к оценке эффективности регрессионной модели (1)–(5) для прогнозирования хода глобальной ТАВ на основе данных остальных климатообразующих величин, являющихся предикторами.

Сопоставим результаты прогнозирования ТАВ и фактическими данными ТАВ CRUTEM после исключения линейных трендов. Из рис. 3 следует, что данные прогноза отклоняются от климатических данных не более чем на значения, предусмотренные доверительными интервалами, отвечающими уровню вероятности 95%. При этом прогностическая кривая, в целом, правильно воспроизводит медленные климатические изменения, происходившие на Земле за рассматриваемый период. Речь идет о похолодании конца XIX и начала XX веков и последующем потеплении 30-х и 40-х годов. Однако фактическое похолодание 60-х и 70-х годов сместилось в прогнозе на 80-е годы. Можно предположить, что требуется

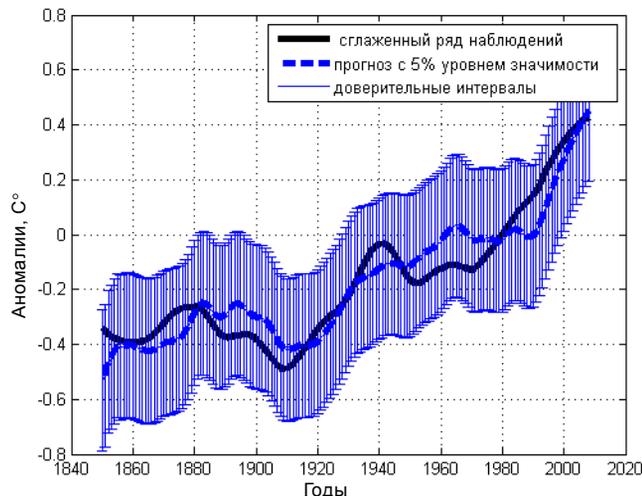


Рис. 4. Сравнение аномалий глобальной температуры атмосферного воздуха (CRUTEM v.3) с включенным трендом и соответствующих результатов прогнозирования с помощью регрессионной модели в сочетании с доверительными интервалами, соответствующими 5%-му уровню статистической значимости.

включение в модель дополнительных факторов, например, индексов Тихого океана (Wallace et al., 1996).

На рис. 4 представлен прогноз глобальных значений ТАВ после включения линейных трендов. Этот прогноз лучше воспроизводит фактический ход глобальной температуры и укладывается в диапазон колебаний, определяемых доверительными интервалами использованных точечных оценок. Для качественного сопоставления приводятся результаты моделирования изменений глобальной температуры с 1880 по 1999 гг. на основе двух приоритетных моделей (американской — GISS AOM

и британской — HAD CM), заимствованные из работы (Estrada et al., 2013) (рис. 5). Очевидно, что для практических нужд требуется, прежде всего, прогноз не на столетие вперед, а более детализированный прогноз тенденций климатических изменений на несколько лет или на десятилетие. Именно такую задачу решает предлагаемый подход.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем основные выводы, полученные в данном исследовании. Предложено использование множественной регрессии для создания статистической модели описания климатических изменений под влиянием заданных климатообразующих факторов. Эта модель обеспечивает не только оценки временной эволюции глобальной температуры, но также и совокупность соответствующих доверительных интервалов с высоким уровнем статистической значимости (вероятности). Исключение линейного тренда климатических рядов температуры (CRUTEM) и концентрации CO₂ в атмосфере позволяет объективно и количественно оценить роль естественных факторов изменения климата. Глобальная температура CRUTEM квазисинхронно реагирует на колебания средней температуры поверхности северной Атлантики (индекс AMO), но с запаздыванием около 15 лет — на изменения солнечной активности (числа Вольфа). Линейный тренд роста концентрации CO₂ в атмосфере покрывает почти всю межгодовую изменчивость и отражает линейный тренд глобальной температуры.

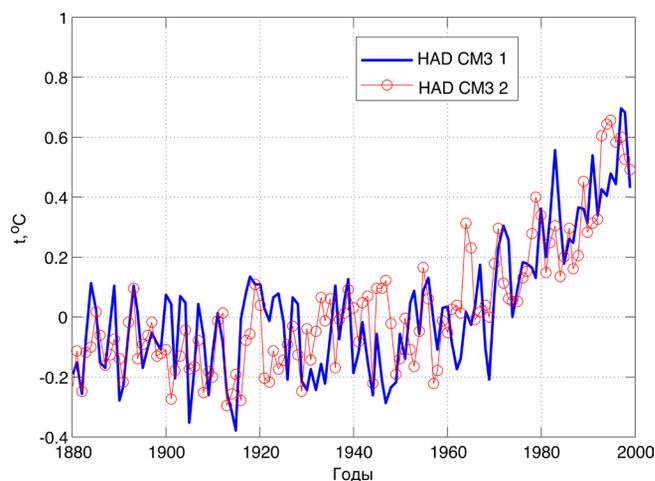
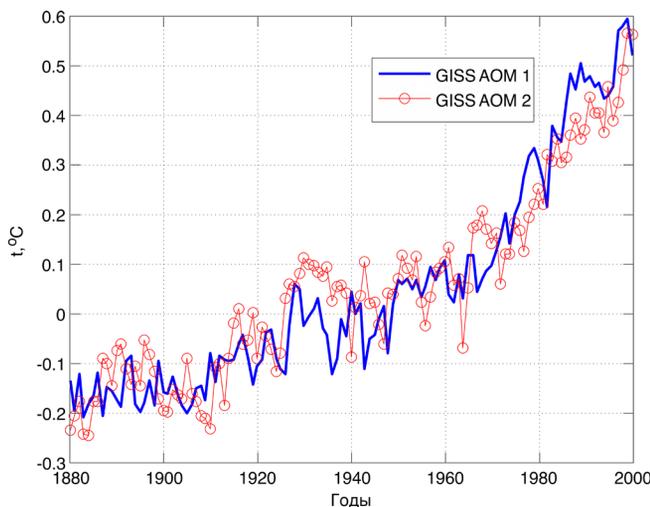


Рис. 5. Ряды глобальной температуры в период 1880-1999 гг., основанные на климатических моделях: американской — GISS AOM и британской — HAD CM (Estrada et al., 2013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Покровский О.М.* Определение среднемесячных осадков на территории России по данным дистанционных измерений // Исследование Земли из космоса. 2004. № 3. С. 22–31.
- Покровский О.М.* Температура поверхности океана как индикатор естественных колебаний климата в умеренных и высоких широтах северного полушария // Исследование Земли из космоса. 2005. № 6. С. 3–13.
- Покровский О.М.* Изменения температуры поверхности океана в Северной Атлантике и колебания климата Европы // Исследование Земли из космоса. 2005. № 4. С. 24–34.
- Покровский О.М.* Применение данных дистанционного зондирования температуры поверхности океана, ледового покрова и атмосферы в Арктике для изучения тенденций изменения климата России // Исследование Земли из космоса. 2007. № 3. С. 20–33.
- Покровский О.М.* Анализ факторов изменения климата по данным дистанционных и контактных измерений // Исследование Земли из космоса. 2010. № 5. С. 11–24.
- Ферстер Э., Ренц Б.* Методы корреляционного и регрессионного анализа. М.: Финансы и статистика, 1983. 304 с.
- Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М.* Изменения климата Арктики и Антарктики — результат действия естественных причин // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2. С. 52–61.
- Broecker W.S., Peteet D.M., Rind D.* Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation? // Nature. 1985. V. 315, P. 21–26.
- Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F.B., Jones P.D.* Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850 // J. Geophysical Research. 2006. V. 111. P. D12106, doi: 10.1029/2005JD006548
- Christy J.R., Herman B., Pielke R., Sr. et al.* What Do Observational Datasets Say About Modeled Tropospheric Temperature Trends Since 1979? // Remote Sensing. 2010. V. 2. № 9. P. 2148–2169.
- Christy J.R., Spencer R.W., Braswell W.D.* MSU Tropospheric Temperatures: Dataset Construction and Radiosonde Comparisons // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 1999. V. 17. № 9. P. 1153–1170. doi:10.1175/1520-0426
- Courtillot V. et al.* Multi-Decadal Trends of Global Surface Temperature: A Broken Line with Alternating ~30 yr Linear Segments? // Atmospheric and Climate Sciences. 2013. V. 3. № 3. P. 364–371.
- Dickey D.A., Fuller W.A.* Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root // Journal of the American Statistical Association. 1979. V. 74. P. 427–431.
- Douglass D.H., Christy J.R., Pearson B.D., Singer S.F.* A comparison of tropical temperature trends with model predictions // International Journal of Climatology. 2008. V. 28. № 13. P. 1693–1701. doi:10.1002/joc.1651
- Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J.* The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. // Geophysical Research Letters. 2001. V. 28. P. 2077–2080.
- Estrada F., Perron P., Gay-Garcia C., Martinez-Lopez B.* A Time-Series Analysis of the 20th Century Climate Simulations Produced for the IPCC's Fourth Assessment Report // PLoS One. 2013, V. 8. № 3. P. e60017. doi: 10.1371/journal.pone.0060017
- Global Average Temperature Anomaly Global average is based on HADCRUT4 dataset (combined land and SST values). Data has been updated to V4 from V2 (Time Interval: Monthly Time Coverage: 1856 to 2013). <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>
- Idso S.B.* CO2 and climate: Where is the water vapor feedback? // Theoretical and Applied Climatology. 1982. V. 31. № 4. P. 325–329.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/index.shtml>
- IPCC, 2018: Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>
- Lean J., Beer J., Bradley R.* Reconstruction of Solar Irradiance Since 1610: Implications for Climate Change // Geophysical Research Letters. 1995. V. 22. № 23., P. 3195–3198.
- Lean J., Rind D.* Climate forcing by changing solar radiation // Journal of Climate. 1998. V. 11. P. 3069–3094.
- Lean J.* Evolution of the Sun's Spectral Irradiance since the Maunder Minimum // Geophysical Research Letters. 2000. V. 27. № 16. P. 2425–2428.
- Lorenz E.N.* The predictability of a flow which possesses many scales of motion // Tellus. 1969. V. 21. P. 19.
- Palmer M.D., Harris G.R., Gregory J.M.* Extending CMIP5 projections of global mean temperature change and sea level rise due to thermal expansion using a physically-based emulator // Environ. Res. Lett. 2018. V. 13. P. 084003.
- Parker A.* Why global warming went missing since the year 2000 // Nonlinear Engineering. 2013. V. 2(3–4). P. 129–135. doi:10.1515/nleng-2013-0017
- Pokrovsky O.M.* A coherency between the North Atlantic temperature nonlinear trend, the eastern Arctic ice extent drift and change in the atmospheric circulation regimes over the northern Eurasia. In: Influence of Climate Change and Sub-Arctic Conditions on the Changing Arctic. Nihoul J.C.J., Kostianoy A.G. (Eds.). Springer Science Publ. 2009. P. 25–36. <http://www.springerlink.com/index/n7111278w0866276.pdf>

Pokrovsky O.M. Relationship between the Atlantic Multidecadal Oscillation and the ice extent in Kara Sea // CLIVAR Exchanges. 2010. V. 46. P. 8–9. http://eprints.soton.ac.uk/67029/01/Exch_46.pdf

Rayner N.A., Brohan P., Parker D.E., Folland C.K., Kennedy J.J., Vanicek M., Ansell T., Tett S.F.B. Improved analyses of changes and uncertainties in marine temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: the HadSST2 dataset // *J. Climate*. 2006. V. 19. P. 446–469.

Spencer R.W., Christy J.R. Precise Monitoring of Global Temperature Trends from Satellites // *Science*. 1990. V. 247. P. 1558–1562. doi:10.1126/science.247.4950.1558

Sunspot Index. Monthly sunspot numbers. Time Interval: Monthly, Time Coverage: 1749 to May 2018. SIDC, RWC Belgium, World Data Center for the Sunspot Index, Royal Observatory of Belgium. 2018. <http://sidc.oma.be/html/SIDCpub.html>

Tett S.F.B., Stott P.A., Allen M.R., Ingram W.J., Mitchell J.F.B. Causes of twentieth century temperature change near the Earth's surface // *Nature*. 1999. V. 399. P. 569–572.

Wallace J.M., Zhang J., Bajuk L. Interpretation of inter decadal trends in Northern Hemisphere surface air temperature // *J. Climate*. 1996. V. 9. № 2. P. 249–259.

Quantitative Estimates of the Impact of the Most Important Factors on Global Climate Change Over the Past 150 Years

O. M. Pokrovsky

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

We proposed the implementation of the multiple regression to create a statistical model for description of the climate change under the influence of specified climate-impacting factors. This model provides not only estimates of the temporal evolution of global temperature, but also a set of corresponding confidence intervals with a given level of statistical significance (probability). The elimination of the linear trend of climatic temperature series (CRUTEM) and atmospheric CO₂ concentration allows objectively and quantitatively assess the impact of natural climate change factors. The global CRUTEM temperature responds quasi-synchronously to fluctuations in the average surface temperature of the North Atlantic (AMO index), but with a delay of about 15 years – on changes in solar activity (Wolf numbers). The linear trend of increasing CO₂ concentrations in the atmosphere explains almost all the interannual variability and reflects the linear trend of global temperature, but it covers a part of its interannual variability.

Keywords: climate change, statistical climate models, climate change factor estimates, climate regression model

REFERENCES

- Broecker W.S., Peteet D.M., Rind D.* Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation? // *Nature*. 1985. V. 315. P. 21–26.
- Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F.B., Jones P.D.* Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850 // *J. Geophysical Research*. 2006. V. 111. P. D12106. doi:10.1029/2005JD006548
- Christy J.R., Herman B., Pielke R., Sr. et al.* What Do Observational Datasets Say About Modeled Tropospheric Temperature Trends Since 1979? // *Remote Sensing*. 2010. V. 2. № 9. P. 2148–2169.
- Christy J.R., Spencer R.W., Braswell W.D.* MSU Tropospheric Temperatures: Dataset Construction and Radiosonde Comparisons // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1999. V. 17. № 9. P. 1153–1170. doi:10.1175/1520–0426
- Courtillot V. et al.* Multi-Decadal Trends of Global Surface Temperature: A Broken Line with Alternating ~30 yr Linear Segments? // *Atmospheric and Climate Sciences*, 2013. V. 3. № 3, P. 364–371.
- Dickey D.A., Fuller W.A.* Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root // *Journal of the American Statistical Association*. 1979. V 74. P. 427–431.
- Douglass D.H., Christy J.R., Pearson B.D., Singer S.F.* A comparison of tropical temperature trends with model predictions // *International Journal of Climatology*. 2008. V. 28. № 13. P. 1693–1701. doi:10.1002/joc.1651
- Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J.* The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. // *Geophysical Research Letters*. 2001, V. 28, P. 2077–2080.
- Estrada F., Perron P., Gay-Garcia C., Martinez-Lopez B.* A Time-Series Analysis of the 20th Century Climate Simulations Produced for the IPCC's Fourth Assessment Report // *PLoS One*. 2013. V. 8. № 3. P. e60017. doi: 10.1371/journal.pone.0060017.
- Global Average Temperature Anomaly Global average is based on HADCRUT4 dataset (combined land and SST values). Data has been updated to V4 from V2 (Time Interval: Monthly Time Coverage: 1856 to 2013). <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>
- Förster E., Renz B.* Metody korrelyatsionnogo i regressionnogo analiza [Methods of correlation and regression analysis] M.: Finansy i statistika, 1983. 304 p. (in Russian).

- Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolyanitskii V.M.* Izmeneniya klimata Arktiki i Antarktiki — rezul'tat deistviya estestvennykh prichin [Climate change in the Arctic and Antarctic — the result of natural causes] // *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2010. № 2. p. 52–61. (in Russian).
- Idso S.B.* CO₂ and climate: Where is the water vapor feedback? // *Theoretical and Applied Climatology*. 1982. V. 31. № 4. P. 325–329.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/index.shtml>
- IPCC, 2018: Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>
- Lean J., Beer J., Bradley R.* Reconstruction of Solar Irradiance Since 1610: Implications for Climate Change // *Geophysical Research Letters*, 1995. V. 22. № 23. P. 3195–3198.
- Lean J., Rind D.* Climate forcing by changing solar radiation // *Journal of Climate*. 1998. V. 11. P. 3069–3094.
- Lean J.* Evolution of the Sun's Spectral Irradiance since the Maunder Minimum // *Geophysical Research Letters*. 2000. V. 27. № 16. P. 2425–2428.
- Lorenz E.N.* The predictability of a flow which possesses many scales of motion // *Tellus*. 1969. V. 21. P. 19.
- Palmer M.D., Harris G.R., Gregory J.M.* Extending CMIP5 projections of global mean temperature change and sea level rise due to thermal expansion using a physically-based emulator // *Environ. Res. Lett.* 2018. V. 13. P. 084003.
- Parker A.* Why global warming went missing since the year 2000 // *Nonlinear Engineering*. 2013. V. 2(3–4). P. 129–135. doi:10.1515/nleng-2013-0017
- Pokrovsky O.M.* A coherency between the North Atlantic temperature nonlinear trend, the eastern Arctic ice extent drift and change in the atmospheric circulation regimes over the northern Eurasia. In: *Influence of Climate Change and Sub-Arctic Conditions on the Changing Arctic*. Nihoul J.C.J., Kostianoy A.G. (Eds.). Springer Science Publ. 2009. P. 25–36. <http://www.springerlink.com/index/n7111278w0866276.pdf>
- Pokrovsky O.M.* Analiz faktorov izmeneniya klimata po dannym distantsionnykh i kontaktnykh izmerenii [Analysis of climate change factors using remote sensing and contact measurements] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2010. № 5. p. 11–24. (in Russian).
- Pokrovsky O.M.* Izmeneniya temperatury poverkhnosti okeana v Severnoi Atlantike i kolebaniya klimata Evropy [Changes in ocean surface temperature in the North Atlantic and variations in European climate] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2005. № 4. p. 24–34. (in Russian).
- Pokrovsky O.M.* Opredelenie srednemesyachnykh osadkov na territorii Rossii po dannym distantsionnykh izmerenii [Determination of average monthly precipitation in Russia from remote sensing data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2004. № 3. p. 22–31. (in Russian).
- Pokrovsky O.M.* Primenenie dannykh distantsionnogo zondirovaniya temperatury poverkhnosti okeana, ledovogo pokrova i atmosfery v Arktike dlya izucheniya tendentsii izmeneniya klimata Rossii [Using remote sensing data on ocean surface temperature, ice cover and atmosphere in the Arctic to study climate change trends in Russia] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2007. № 3. p. 20–33. (in Russian).
- Pokrovsky O.M.* Relationship between the Atlantic Multidecadal Oscillation and the ice extent in Kara Sea // *CLIVAR Exchanges*. 2010. V. 46. P. 8–9. http://eprints.soton.ac.uk/67029/01/Exch_46.pdf
- Pokrovsky O.M.* Temperatura poverkhnosti okeana kak indikator estestvennykh kolebanii klimata v umerennykh i vysokikh shirotakh severnogo polushariya [Ocean surface temperature as an indicator of natural climate variations in temperate and high latitudes of the northern hemisphere] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2005. № 6. p. 3–13. (in Russian).
- Rayner N.A., Brohan P., Parker D.E., Folland C.K., Kennedy J.J., Vanicek M., Ansell T., Tett S.F.B.* Improved analyses of changes and uncertainties in marine temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: the HadSST2 dataset // *J. Climate*, 2006. V. 19. P. 446–469.
- Spencer R.W., Christy J.R.* Precise Monitoring of Global Temperature Trends from Satellites // *Science*. 1990. V. 247. P. 1558–1562. doi:10.1126/science.247.4950.1558
- Sunspot Index. Monthly sunspot numbers. Time Interval: Monthly, Time Coverage: 1749 to May 2018. SIDC, RWC Belgium, World Data Center for the Sunspot Index, Royal Observatory of Belgium. 2018. <http://sidc.oma.be/html/SIDCpub.html>
- Tett S.F.B., Stott P.A., Allen M.R., Ingram W.J., Mitchell J.F.B.* Causes of twentieth century temperature change near the Earth's surface // *Nature*. 1999. V. 399. P. 569–572.
- Wallace J.M., Zhang J., Bajuk L.* Interpretation of inter decadal trends in Northern Hemisphere surface air temperature // *J. Climate*. 1996. V. 9. № 2. P. 249–259.