

ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ
GEOGRAPHY. GEOECOLOGY

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-2-5-13>
УДК 551.509.333

Поступила в редакцию 17.10.2024
Received 17.10.2024

**КОМПОНЕНТНО-ГАРМОНИЧЕСКИЙ МЕТОД СВЕРХДОЛГОСРОЧНОГО
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АТЛАНТИЧЕСКОЙ МУЛЬТИДЕКАДНОЙ ОСЦИЛЛЯЦИИ**

В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Сверхдолгосрочный прогноз (на год вперед и более) многолетних изменений Атлантической мультideкадной осцилляции (АМО) в силу преобладающего влияния Северной Атлантики на температурно-влажностный режим Беларуси представляет существенный научный и практический интерес. С целью создания указанного прогноза использовался такой известный метод сверхдолгосрочного прогнозирования, как компонентно-гармонический. Было формализовано несколько вариантов аддитивных моделей адаптивного характера на основе линейного тренда и гармонических компонент, имитирующих квазигармонические колебания.

Модели построены с использованием скользящих временных окон с формированием прогноза на год, следующий за обучающей выборкой (скользящим окном). Рассматривались различные варианты скользящих окон, выбранных исходя из выявленных длительностей квазিশестидесятилетней и квазидевятилетней гармоник. Определено, что второй по значимости вслед за квазешестидесятилетним колебанием в формировании значений АМО является квазидевятилетняя гармоника. Коэффициент корреляции наилучших моделей с наблюдаемыми данными $\rho = 0,6-0,7$. К недостаткам моделей следует отнести занижение значений среднеквадратического отклонения.

Ключевые слова: Атлантическая мультideкадная осцилляция; сверхдолгосрочное прогнозирование; квазигармонические колебания.

Для цитирования. Логинов В. Ф., Микуцкий В. С. Компонентно-гармонический метод сверхдолгосрочного прогнозирования Атлантической мультideкадной осцилляции // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 5–13.

**THE COMPONENT-HARMONIC METHOD OF ULTRA-LONG-TERM FORECASTING
OF THE ATLANTIC MULTIDECADAL OSCILLATION**

V. F. Loginov, V. S. Mikutskiy

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. Due to the predominant influence of the North Atlantic on the temperature and humidity regime of Belarus, the forecast of the dynamics of such a temperature indicator as the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) is of significant interest for the development of ultra-long-term forecasting methods (for a year ahead and more). In order to create this forecast, such a well-known ultra-long-term forecasting method was used as the component-harmonic method was used. Several variants of additive models of adaptive nature were formalized based on a linear trend and harmonic components simulating quasi-harmonic oscillations.

The models were built using moving time windows with a forecast for the year following the learning sample (moving window). Various variants of moving windows were considered, selected based on the revealed durations of the quasi-six-decade and quasi-nine-year harmonics. It is determined that the second most important after the quasi-sixty-year oscillation in the formation of AMO values is the quasi-nine-year harmonic. The correlation coefficient of the best models with the observed data is $\rho = 0,6-0,7$. The disadvantages of the models include underestimating of the values of the standard deviation.

Keywords: Atlantic Multidecadal Oscillation; ultra-long-term forecasting; quasi-harmonic oscillations.

For citation. Loginov V. F., Mikutskiy V. S. The component-harmonic method of ultra-long-term forecasting of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 5–13.

Введение. В настоящее время в научном сообществе имеется общее понимание того, что в климатической системе, включающей в себя океан, атмосферу, криосферу, биосферу, могут развиваться автоколебания различной длительности: от нескольких месяцев до нескольких сотен тысяч лет [1, 2].

Наличие колебания с периодом около 60–70 лет было неоднократно установлено в таких крупномасштабных характеристиках климатической системы, как Северо-Атлантическое и Северо-Тихоокеанское колебания. Краткий обзор таких работ представлен в наших последних работах [3–6], а также работах других авторов [7–14]. Как показано в работе О. М. Покровского [11], ярко квазистесятилетнее колебание проявляется в температуре Северного полушария и особенно в температуре высоких широт названного полушария. Причем 60–70-летнее колебание не может быть связано с антропогенной деятельностью, поскольку тренд в разностях температуры Северного и Южного полушарий не обнаруживается, хотя основные источники парниковых газов находятся в Северном полушарии [8].

В работе [3] обнаружено наличие квазипятидесятилетнего колебания в изменении продолжительности арктических вторжений.

В работе [5] установлен ряд особенностей в изменении амплитуды квазистесятилетнего колебания:

1) увеличение амплитуды квазистесятилетней компоненты от экватора в направлении высоких широт каждого из полушарий Земли: в приполярных районах доля дисперсии квазистесятилетней компоненты от общей дисперсии ряда температуры достигает 47,6 % в Северной Атлантике и до 38 % в приантарктических широтах;

2) увеличение амплитуды квазистесятилетней компоненты в изменении температуры в области таких холодных течений, как Лабрадорское и Канарское.

Одной из очевидных причин появления автоколебаний в климатической системе является непрерывное поступление солнечной энергии в экваториальные районы и переохлаждение полярных районов, что влечет обмен энергией между инерционными ее накопителями (морские льды и теплый океан в низких широтах). В отличие от океана, в силу малой инерционности («памяти») атмосфера не может накапливать энергию. В инерционных системах – океан и криосфера – период автоколебаний будет существенно более длительным [1].

Важным регулятором взаимодействия океана и атмосферы и фактором возникновения автоколебаний в функционирующей климатической системе является облачность [15]. Процесс колебаний, связанных с облачностью, вызывается потоком коротковолновой радиации. Его высокая дивергенция летом приводит к нагреванию верхнего слоя океана. Океан нагревает атмосферу, в которой развивается конвекция, приводящая к росту облачности. Растущая облачность препятствует проникновению радиации к океану, он охлаждается и охлаждает атмосферу. Конвекция прекращается, облачность уменьшается, что вновь приводит к нагреванию океана, и цикл повторяется вновь [15].

Еще в 1940-х годах академик В. В. Шулейкин дал объяснение автоколебательной системы Северной Атлантики, рассмотрев следующую цепь: ледовитость Арктики → усиление интенсивности Лабрадорского течения → уменьшение интенсивности теплового течения Гольфстрим → увеличение ледовитости Арктики [2].

В работах У. Брокера показано, что различие солености морских вод порождает перенос тепла теплыми океаническими водами Атлантики в высокие широты, тогда как холодные поверхностные воды Тихого океана движутся на юг, оттесняя теплые воды к экватору [16]. Связанные с этим различия в процессах испарения оказывают обратное влияние на соленость. Такая циркуляция является автоколебательной, поскольку избыточное испарение вызывает глубинные плотностные течения к югу, а глубинные течения, в свою очередь, вызывают избыточное испарение.

Считается, что мультидекадные изменения климата во многом порождаются долгопериодными изменениями в термохалинной циркуляции вод Северной Атлантики. Во всех характеристиках этой циркуляции на значимом уровне выделяются долгопериодные квазициклические колебания с характерными периодами 50–70 лет. Это явление получило название Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО) [17, 18]. В качестве индикатора данных колебаний широко используется индекс АМО, представляющий собой аномалии среднемесячной температуры поверхности моря в Северной Атлантике. К настоящему времени получен ряд АМО с почти полуторавековой длительностью (1856–2022 гг.) [19].

В работе [6] выявлено наличие мощной квазистесятилетней компоненты в изменении индекса АМО, вклад которой в общую изменчивость рядов составляет в среднем до 47 % в отдельные месяцы теплого времени года. Установлено также наличие заметной квазидесятилетней гармоник в колебаниях индекса АМО. Вклад квазидесятилетней гармоник от общей изменчивости рядов достигает от 7 до 11 %. Для среднегодовых значений АМО вклад квазидесятилетнего колебания составляет около 8,5 %.

Цели, материалы и методика исследований. В представленной работе с целью разработки метода сверхдолгосрочного прогнозирования АМО рассмотрено и формализовано несколько вариантов аддитивных моделей с использованием компонентно-гармонического метода сверхдолгосрочного

прогнозирования. Подобный метод неоднократно использовался в работах И. В. Максимова и его школы [20], а также в работах других авторов [21].

Использовались данные значений индекса АМО месячного разрешения за период 1856–2022 гг. проекта Kaplan Extended SST V2 [19], доступные на сайте Лаборатории физических наук Национального управления океанических и атмосферных исследований (США) [22]. С учетом того, что особенно ярко АМО проявляло себя в летнее время года, первым этапом запланированного исследования стал анализ июльских значений АМО за 1880–2022 гг. Для последнего периода ряд АМО представляется нам более достоверным по сравнению с рядом для периода 1856–1879 гг., когда плотность метеорологической сети наблюдений была еще недостаточной.

Исходя из изложенных выше результатов [6], особое внимание уделялось квазিশестидесятилетнему и квазидевятилетнему циклам, учет которых в каждой из моделей проводился функциями косинуса с выделенными периодами и фазами колебаний.

С одной стороны, в работе [5] было показано, что полный цикл кругооборота воды от субтропического пояса Атлантического океана Южного полушария до полярных широт Северной Атлантики составляет около 62 лет. С другой стороны, генерализированные особенности изменений температуры воды Атлантического океана, выявленные на основе метода анализа сингулярного спектра (Singular Spectrum Analysis, SSA), указывают на наличие квазিশестидесятилетней волны в широтном поясе 55°–66° с. ш. с периодом близким к 66 годам.

Учитывая, что длительность используемой выборки нельзя признать достаточной для корректного определения длительности квазিশестидесятилетнего периода, и искажающее влияние слабого тренда в изменении АМО в последнее тридцатилетие, вероятно, можно принять длительность квазিশестидесятилетнего колебания в интервале 60–70 лет. В качестве примеров в работе рассматривали 62- и 66-летние гармоники освобожденных от линейного тренда данных. Дополнительно методом наименьших квадратов определялась оптимальная компонента квазিশестидесятилетней продолжительности. Период такой оптимальной гармоники составил 67 лет.

Рассматривали скользящие окна, равные удвоенному периоду указанных выше квазিশестидесятилетних гармоник. В конечном счете, в данном случае в этих окнах строили двухкомпонентные модели, включающие линейный тренд и квазিশестидесятилетнюю гармонику. Характерной особенностью рядов АМО явились малые величины линейного тренда.

Для остатков (отклонений) значений АМО от квазিশестидесятилетних компонент выявлены короткопериодные гармоники близкие к девятилетней квазициклическости с периодами от 8,3 до 9,7 года. Принимая во внимание этот факт, рассматривали также трехкомпонентные модели, включающие короткопериодную гармонику, близкую по продолжительности к 9 годам.

Кроме того, рассматривали варианты использования других гармоник, определяемых путем разложения в ряд Фурье остатков от квазিশестидесятилетнего колебания. Необходимым условием использования таких гармоник принимали требование их максимальной мощности с суммарным вкладом указанных гармоник 50 % от средней мощности сигнала [23, с. 39]. Максимальное число таких гармоник ограничивалось четырьмя.

При выявлении короткопериодных гармоник отдельно рассмотрели варианты использования не только указанных выше скользящих окон, но и укороченных окон, полагая, что использование гармоник на более близких к прогнозируемому году отрезках времени увеличит точность прогноза.

Таким образом, рассмотрели несколько типов моделей:

1) двухкомпонентные модели, включающие линейный тренд и квазিশестидесятилетнюю гармонику с использованием скользящих окон длиной 124, 132 и 134 года; при этом в первых двух случаях длину окна фиксировали, а в последнем случае определяли исходя из выявленной оптимальной квазিশестидесятилетней косинус-кривой для освобожденных от линейного тренда данных;

2) трехкомпонентные модели с учетом короткопериодных гармоник.

В свою очередь, трехкомпонентные модели были поделены на подтипы двумя разными способами:

а) по принципу отбора гармоник третьей компоненты:

– с использованием одной квазидевятилетней гармоники;

– с использованием набора гармоник с максимальной мощностью;

б) по разновидности скользящих окон для отбора гармоник третьей компоненты:

– с использованием исходного скользящего окна;

– с использованием укороченных скользящих окон.

Для каждого из трех основных периодов (62, 66 и 67 лет) было построено по пять моделей описанных типов. При описании результатов для двухкомпонентных моделей использовали обозначение М1. Сводка обозначений трехкомпонентных гармонических моделей приведена в таблице.

При оценке точности разработанных моделей и сравнении прогнозов по ним с наблюдаемыми данными использовали диаграммы Тейлора [24] – удобный инструмент визуализации и оценки качества моделей. Данные диаграммы широко применяются для оценки моделей, разработанных для изучения климата и других аспектов окружающей среды Земли [25]. Они обеспечивают комплексную оценку путем одновременного рассмотрения нескольких статистических показателей на одной легко интерпретируемой диаграмме.

Обозначения подтипов трехкомпонентных гармонических моделей АМО

Designations of subtypes of three-component harmonic AMO models

Тип скользящего окна при расчете гармоник третьей компоненты	Способ отбора гармоник третьей компоненты	
	Набор гармоник с максимальной мощностью	Одна квазидевятилетняя гармоника
Исходное окно	M2	M3
Укороченное окно	M4	M5

Каждый из наборов данных (сравниваемых моделей и наблюдений) представляется на диаграмме в виде точки трехкомпонентного поля, отображающей коэффициент корреляции Пирсона (ρ) модельных результатов с наблюдаемыми данными, центрированную среднеквадратичную ошибку модели (RMSE, E') и коэффициент собственного стандартного отклонения (σ). Поскольку наблюдаемые данные также представлены на диаграмме Тейлора в виде соответствующей контрольной точки, диаграмма помогает оценить, насколько хорошо каждая из моделей воспроизводит наблюдаемые закономерности и изменчивость: степень близости к контрольной точке отражает общую точность модели. Модель, наиболее близкая к контрольной точке, наилучшим образом воспроизводит наблюдаемые данные. Отметим, что стандартному набору отображаемых оценок (ρ , E' и σ) отвечает функциональная связь между ними:

$$E'^2 = \sigma_n^2 + \sigma_m^2 - 2\sigma_n\sigma_m\rho, \quad (1)$$

где σ_n и σ_m – стандартные отклонения наблюдений и модельных данных соответственно. Сходство условия (1) с известной теоремой косинусов для расчета длин сторон треугольника:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos\varphi,$$

где φ – угол между сторонами a и b , позволяет на основе этой геометрической аналогии установить взаимосвязь между четырьмя величинами, лежащими в основе построения диаграммы Тейлора. Соответственно, коэффициенту корреляции ρ на диаграмме отвечает азимутальный угол модельной точки; центрированная среднеквадратичная ошибка E' моделируемого поля пропорциональна расстоянию от модельной точки до контрольной точки на оси OX ; стандартные отклонения σ_n и σ_m наблюдений и модельных данных пропорциональны радиальным расстояниям от начала координат контрольной и модельной точек соответственно.

В работе при построении диаграмм Тейлора использовали специализированный пакет программного обеспечения с открытым исходным кодом [26].

Результаты и их обсуждение. Тестирование полученных результатов проводили путем сравнения их с наблюдаемыми данными, а также с простейшими моделями 30-летнего скользящего среднего с правосторонним осреднением (MR, когда среднее для периода значение относится к последнему члену скользящего окна) и центральным (MC, когда среднее для периода значение относится к его середине), в последнем случае происходило уменьшение длины скользящего окна при приближении к конечному сроку наблюдений (2022 г.).

На рис. 1 представлены графики данных моделей АМО с указанием границ разброса значений АМО, определяемых соответствующими скользящими среднеквадратическими отклонениями (СКО).

На рис. 2 изображены диаграммы Тейлора сравнения наблюдаемых и модельных июньских значений индекса АМО (показатели ρ , E' и σ) при скользящем окне оптимальной длины (67 лет, а), а также при окнах длины 62 (б) и 66 (в) лет.

Из рис. 2 следует, что прогнозы по моделям MR правостороннего скользящего среднего ожидаемо относятся к числу наихудших относительно показателей коэффициента корреляции ρ и среднеквадратической ошибки E' независимо от выбора основного периода. Двухкомпонентные модели M1 при учете всех трех показателей (σ , E' и ρ) также ожидаемо оказались в числе наихудших моделей во всех трех случаях.

Введение при прогнозировании АМО в модель третьей компоненты с преимущественно короткопериодными членами в большинстве случаев приводит к улучшению качества прогноза. Тем не менее все модели показали заниженные значения среднеквадратического отклонения ($\sigma_{\text{набл.}} = 0,23$): для модели M5 с наилучшими показателями коэффициента корреляции ρ с наблюдаемыми данными – почти в 2 раза. Исключение составляет модель M3 (рис. 2, б), однако если учесть высокие значения ее среднеквадратических ошибок E' , а также самые низкие или близкие к ним показатели коэффициента корреляции ρ с наблюдаемыми данными, то эти варианты прогноза оказались неудовлетворительными.

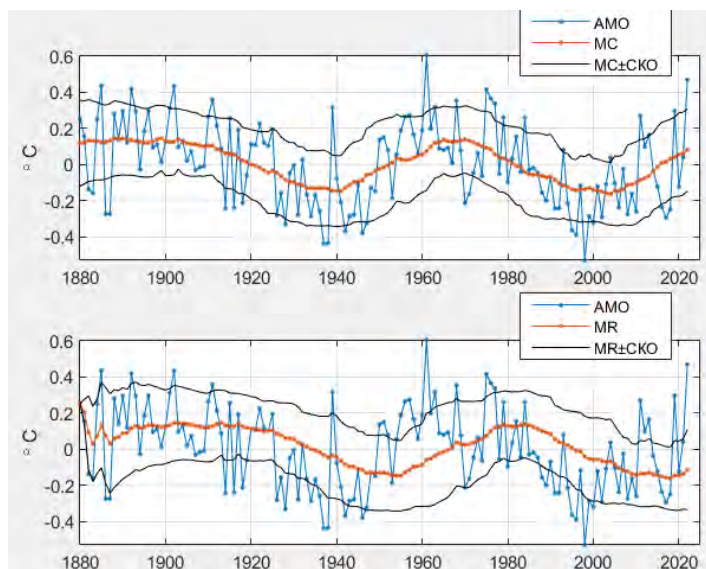


Рис. 1. Исходные значения АМО (июль) и 30-летние скользящие средние осреднения (центральное – сверху и правостороннее – внизу) с соответствующими границами разброса

Fig. 1. Original values of AMO (July) and 30-year moving averages (central – up and right-hand – down) with corresponding scatter boundaries

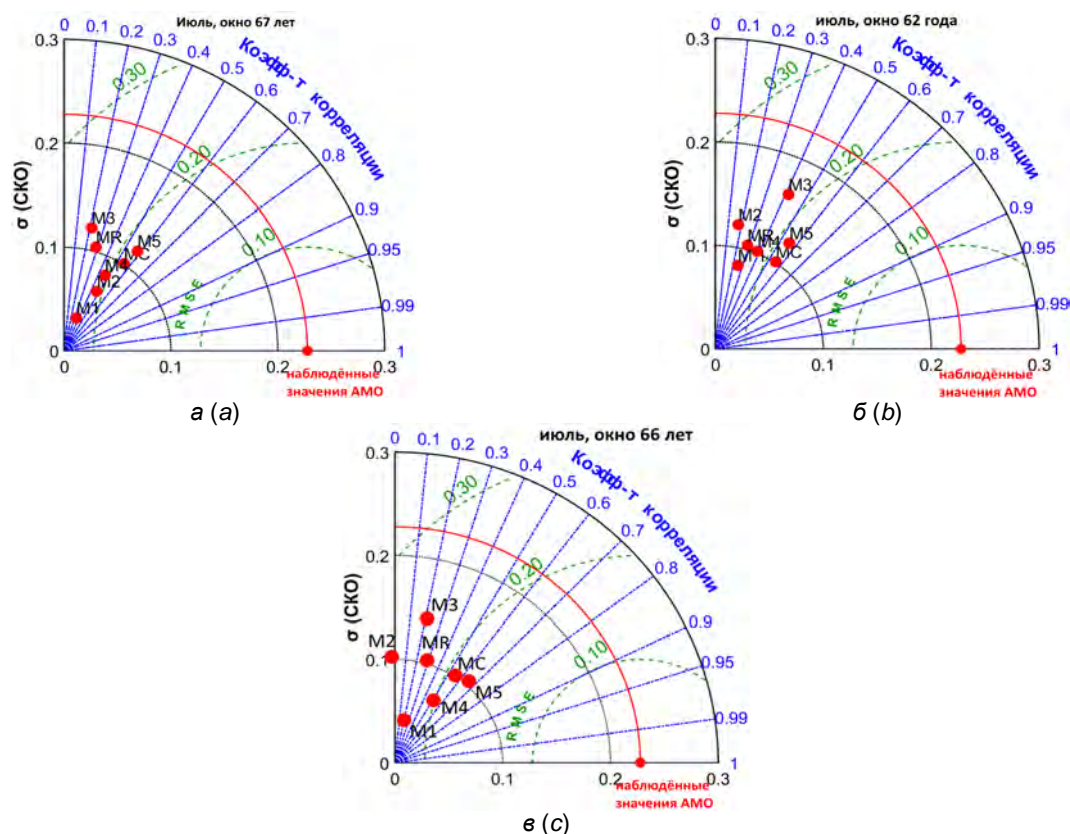


Рис. 2. Диаграммы Тейлора сравнения наблюдаемых и модельных значений индекса АМО (июль):
 а – модели, включающие оптимизированное 67-летнее колебание;
 б – модели, включающие 62-летнее колебание; в – модели, включающие 66-летнее колебание.
 Обозначения моделей те же, что и в таблице

Fig. 2. Taylor diagrams comparing the observed and model values of the AMO index (July);
 а – models including an optimized 67-year oscillation; б – models including a 62-year oscillation;
 с – models including a 66-year oscillation. The model designations are the same as in Table

Важно отметить, что прогностические свойства моделей, использующих укороченное окно при построении третьей компоненты (M4 и M5), существенно превосходят таковые моделей M2 и M3, работающих на исходной учебной выборке (текущем скользящем окне). Это говорит о важности учета динамики амплитуды и фазировки гармоник третьей компоненты.

Отметим также, что некоторые из указанных моделей занижают прогнозные показатели по сравнению с данными наблюдений, причиной чего может быть отсутствие дополнительного учета линейного тренда на выбранном укороченном окне.

В целом, с учетом всех трех показателей (σ , E' и ρ) наилучшими моделями оказались трехкомпонентные модели M5 с показателями

$$\rho = 0,58, 0,56, 0,65; \quad E' = 0,20, 0,18, 0,18; \quad \sigma = 0,12, 0,10, 0,12$$

при использовании выявленных квазишестидесятилетних составляющих длительностью 67 (оптимизированная гармоника), 62 и 66 лет соответственно.

Подчеркнем, что все отмеченные модели превосходят показатели модели MC центрального 30-летнего скользящего среднего.

На рис. 3 приведены траектории полученных прогнозных значений согласно отмеченным выше моделям M5. На диаграммах также отмечены результаты соответствующих двухкомпонентных моделей и центрального 30-летнего осреднения (MC) с границами разброса, отвечающими соответствующим скользящим среднеквадратическим отклонениям AMO.

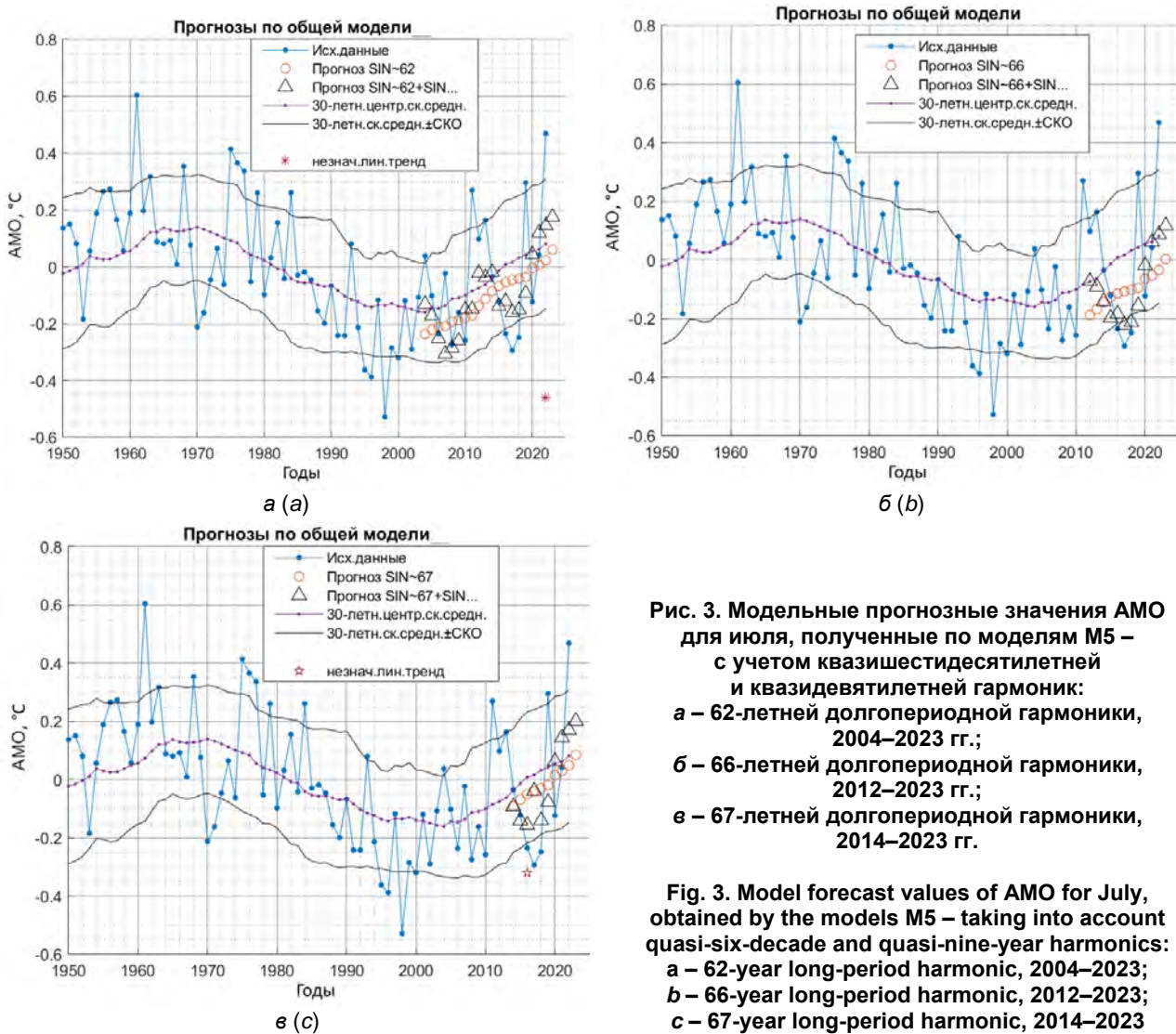


Рис. 3. Модельные прогнозные значения AMO для июля, полученные по моделям M5 – с учетом квазишестидесятилетней и квазидевятилетней гармоник: а – 62-летней долгопериодной гармоник, 2004–2023 гг.; б – 66-летней долгопериодной гармоник, 2012–2023 гг.; в – 67-летней долгопериодной гармоник, 2014–2023 гг.

Fig. 3. Model forecast values of AMO for July, obtained by the models M5 – taking into account quasi-six-decade and quasi-nine-year harmonics: а – 62-year long-period harmonic, 2004–2023; б – 66-year long-period harmonic, 2012–2023; с – 67-year long-period harmonic, 2014–2023

Заключение. Анализ качества моделей показывает, что выбор в качестве третьей компоненты модели одной квазидевятилетней гармоники предпочтительнее набора четырех гармоник с максимальной мощностью. Это свидетельствует о преобладающем влиянии именно квазидевятилетней гармоники в формировании значений АМО. Включение добавочных гармоник служит источником дополнительного «шума» при прогнозировании. В этой связи при использовании компонентно-гармонического метода следует проводить тщательное «просеивание» предикторов. Обилие используемых предикторов не может служить гарантией успешного прогнозирования.

Качество прогнозов моделей, использующих укороченное окно при построении третьей компоненты, существенно выше, чем у моделей, работающих на исходной учебной выборке (текущем скользящем окне). Это указывает на то, что предварительный учет модуляции амплитуды и фазировки гармоник, отобранных для третьей компоненты (в первую очередь квазидевятилетней), также может повысить точность прогноза. Выявленная в наших предыдущих работах [4, 6], а также других работах, обзор которых приведен в работе Б. Г. Шерстюкова [13], дополнительная модуляция амплитуд и фаз короткопериодных колебаний может быть результатом биений близких по длительности восьми- и девятилетних колебаний в климатической системе или определяться действием слабой внешней силы, имеющей космическое происхождение. Дополнительным элементом улучшения оправдываемости прогнозов АМО части из представленных моделей, занижающих прогнозные показатели, может служить учет линейного тренда АМО в выбранном укороченном окне.

Список использованных источников

1. Сергин, В. Я. Системный анализ проблемы больших колебаний климата и оледенения Земли / В. Я. Сергин, С. Я. Сергин. – М. : Гидрометеиздат, 1978. – 280 с.
2. Шулейкин, В. В. Физика моря / В. В. Шулейкин. – М. : Наука, 1968. – 1083 с.
3. Логинов, В. Ф. Современные изменения глобального и регионального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 315 с.
4. Логинов, В. Ф. Космические факторы климатических изменений / В. Ф. Логинов ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Минск, 2020. – 168 с.
5. Логинов, В. Ф. Диагноз глобального климата / В. Ф. Логинов. – СПб. : Лема, 2021. – 304 с.
6. Логинов, В. Ф. Современные изменения климата / В. Ф. Логинов ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – СПб. : Гидротехпроект, 2024. – 267 с.
7. Бышев, В. И. Синоптическая и крупномасштабная изменчивость океана и атмосферы / В. И. Бышев. – М. : Наука, 2003. – 343 с.
8. О колебаниях глобального климата за последние 150 лет / Н. М. Даценко [и др.] // Доклады Российской Академии наук. – 2004. – Т. 399, № 2. – С. 253–256.
9. Изменения климата Арктики и Антарктики: результат действия естественных причин / Е. И. Фролов [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2010. – № 2 (85). – С. 52–61.
10. Нестеров, Е. С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан / Е. С. Нестеров. – М. : Триада, 2013. – 144 с.
11. Покровский, О. М. Анализ факторов изменения климата по данным дистанционных и контактных измерений / О. М. Покровский // Исследования Земли из космоса. – 2010. – № 5. – С. 11–24.
12. Полонский, А. Б. Роль океана в изменениях климата / А. Б. Полонский. – Киев : Наукова думка, 2008. – 183 с.
13. Шерстюков, Б. Г. Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы / Б. Г. Шерстюков. – Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 2021. – 221 с.
14. Scafetta, N. A shared frequency set between the historical mid-latitude aurora records and the global surface temperature / N. Scafetta // J. Atmos. Sol. Ter. Phys. – 2012. – Vol. 74. – P. 145–163. doi:10.1016/j.jastp.2011.10.013
15. Мусаелян, Ш. А. О природе некоторых сверхдлительных атмосферных процессов / Ш. А. Мусаелян. – Л. : Гидрометеиздат, 1978. – 142 с.
16. Brocker, W. S. Unpleasant surprises in the greenhouse? / W. S. Brocker // Nature. – 1987. – Vol. 328. – P. 123–126.
17. Schlesinger, M. E. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years / M. E. Schlesinger, N. Ramanakutty // Nature. – 1994. – Vol. 367. – P. 723–726.
18. Kerr, R. A. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries / R. A. Kerr // Science. – 2000. – Vol. 288, iss. 5473. – P. 1984–1985. doi:10.1126/science.288.5473.1984
19. Analyses of global sea surface temperature 1856–1991 / A. Kaplan [et al.] // Journal of Geophysical Research. – 1998. – Vol. 103, no. C9. – P. 18567–18589.
20. Максимов, И. В. Долгосрочный прогноз многолетних изменений общей ледовитости Баренцева моря, составленный компонентно-гармоническим методом / И. В. Максимов, Н. П. Смирнов, В. Н. Воробьев // Материалы рыбохозяйственных исследований Северного бассейна. – 1964. – Вып. 4. – С. 73–85.
21. Сазонов, Б. И. Солнечно-тропосферные связи / Б. И. Сазонов, В. Ф. Логинов. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – 115 с.
22. NOAA Physical Sciences Laboratory. Climate Timeseries. AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) Index [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.psl.noaa.gov/data/timeseries/AMO>. – Date of access: 09.07.2024.

23. Дженкинс, Г. Спектральный анализ и его приложения / Г. Дженкинс, Д. Ваттс. – М. : Мир, 1971. – Вып. 1. – 320 с.
24. Taylor, K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram / K. E. Taylor // *J. Geophys. Res.* – 2001. – Vol. 106, no. D7. – P. 7183–7192. doi:10.1029/2000JD900719
25. Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets [Electronic resource] / G. Tang [et al.] // *Remote Sensing of Environment.* – Vol. 240. – 2020. – P. 111697. – Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425720300663>. – Date of access: 09.07.2024. doi.org/10.1016/j.rse.2020.111697
26. Rochford, P. SkillMetricsToolbox [Electronic resource] / P. Rochford. – Mode of access: <https://github.com/PeterRochford/SkillMetricsToolbox>. – Date of access: 09.07.2024.

References

1. Sergin V. Ya., Sergin S. Ya. *Sistemnyj analiz problemy bol'shix kolebanij klimata i oledeneniya Zemli* [System analysis of the problem of large fluctuations in climate and glaciation of the Earth]. Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1978, 280 p. (in Russian)
2. Shulejkin V. V. *Fizika morya* [Physics of the sea]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 1083 p. (in Russian)
3. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Sovremennye izmeneniya global'nogo i regional'nogo klimata* [Modern changes in the global and regional climate]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019, 315 p. (in Russian)
4. Loginov V. F. *Kosmicheskie faktory klimaticheskikh izmenenij* [Cosmic factors of climate change]. *Institut prirodopol'zovaniya NAN Belarusi* [Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus]. Minsk, 2020, 168 p. (in Russian)
5. Loginov V. F. *Diagnoz global'nogo klimata* [Diagnosis of the global climate]. St. Petersburg, Lema Publ., 2021, 304 p. (in Russian)
6. Loginov V. F. *Sovremennye izmeneniya klimata* [Modern climate change]. *Institut prirodopol'zovaniya NAN Belarusi* [Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus]. St. Petersburg, Hydrotekhproekt Publ., 2024, 267 p. (in Russian)
7. Byshev V. I. *Sinopticheskaya i krupnomasshtabnaya izmenchivost' okeana i atmosfery* [Synoptic and large-scale variability of the ocean and atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 2003, 343 p. (in Russian)
8. Dacenko N. M., Monin A. S., Berestov A. A., Ivanchenko N. N., Sonechkin D. M. *O kolebaniyah global'nogo klimata za poslednie 150 let* [On global climate fluctuations over the past 150 years]. *Doklady Rossijskoj Akademii nauk = Reports of the Russian Academy of Sciences*, 2004, vol. 399, no. 2, pp. 253–256. (in Russian)
9. Frolov I. E., Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Smolyanitsky V. M. *Izmeneniya klimata Arktiki i Antarktiki: rezul'tat dejstviya estestvennykh prichin* [Climate change in the Arctic and Antarctic: result of natural causes]. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of the Arctic and Antarctic*, 2010, no. 2 (85), pp. 52–61. (in Russian)
10. Nesterov E. S. *Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean* [North Atlantic Oscillation: atmosphere and ocean]. Moscow, Triada Publ., 2013, 144 p. (in Russian)
11. Pokrovskij O. M. *Analiz faktorov izmeneniya klimata po dannym distancionnykh i kontaktnykh izmerenij* [Analysis of climate change factors based on remote and contact measurements]. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa = Earth exploration from space*, 2010, no. 5, pp. 11–24. (in Russian)
12. Polonskij A. B. *Rol' okeana v izmeneniyah klimata* [The role of the ocean in climate change]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 2008, 183 p. (in Russian)
13. Sherstyukov B. G. *Kolebatel'naya sistema klimata, rezonansy, dal'nie svyazi, prognozy* [Climate oscillation system, resonances, teleconnections, forecasts]. Obninsk, All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center Publ., 2021, 221 p. (in Russian)
14. Scafetta N. A shared frequency set between the historical mid-latitude aurora records and the global surface temperature. *J. Atmos. Sol. Ter. Phys.*, 2012, vol. 74, pp. 145–163. doi:10.1016/j.jastp.2011.10.013
15. Musaelyan Sh. A. *O prirode nekotorykh sverhdlitel'nykh atmosferynykh processov* [On the nature of some ultra-long atmospheric processes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978, 42 p. (in Russian)
16. Brocker W. S. Unpleasant surprises in the greenhouse? *Nature*, 1987, vol. 328, pp. 123–126.
17. Schlesinger M. E., Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*, 1994, vol. 367, pp. 723–726.
18. Kerr R. A. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries. *Science*, 2000, vol. 288, iss. 5473, pp. 1984–1985. doi:10.1126/science.288.5473.1984
19. Kaplan A., Kaplan A., Cane M., Kushnir Y., Clement A., Blumenthal M., Rajagopalan B. Analyses of global sea surface temperature 1856–1991. *J. of Geophysical Research*, 1998, vol. 103, no. C9, pp. 18567–18589.
20. Maksimov I. V., Smirnov N. P., Vorobyov V. N. *Dolgosrochnyy prognoz mnogoletnikh izmeneniy obshchey ledovitosti Barentseva morya, sostavlennyy komponentno-garmonicheskim metodom* [Long-term forecast of multi-year changes in the total ice cover of the Barents Sea, compiled by the component-harmonic method]. *Materialy rybokhozyaystvennykh issledovaniy Severnogo basseyna = Materials of fisheries research in the Northern Basin*, 1964, iss. 4, pp. 73–85. (in Russian)
21. Sazonov B. I., Loginov V. F. *Solnechno-troposferny'e svyazi* [Solar-tropospheric connections]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969, 115 p. (in Russian)
22. NOAA Physical Sciences Laboratory. Climate Timeseries. AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) Index. Available at: <http://www.psl.noaa.gov/data/timeseries/AMO> (accessed 9 July 2024).

23. Jenkins G. M., Watts D. G. *Spektral'nyj analiz i ego prilozheniya* [Spectral analysis and its applications]. Moscow, Mir Publ., 1971. 320 p. (in Russian)
24. Taylor K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 2001, vol. 106, no. D7, pp. 7183–7192. doi:10.1029/2000JD900719
25. Tang G., Clark M. P., Papalexiou S. M., Ma Z., Hong Y. Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets. *Remote Sensing of Environment*, 2020, vol. 240, 111697. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425720300663> (accessed 9 July, 2024). doi:10.1016/j.rse.2020.111697
26. Rochford P. SkillMetricsToolbox. Available at: <https://github.com/PeterRochford/SkillMetricsToolbox> (accessed 9 July 2024).

Информация об авторах

Логинов Владимир Фёдорович – академик, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Микуцкий Владимир Станиславович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: mvs@nature-nas.by

Information about the authors

Vladimir F. Loginov – Academician, D. Sc. (Geography), Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Vladimir S. Mikutsky – Ph.D. (Physical and Mathematical), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: mvs@nature-nas.by