

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCES

УДК 551.509.3
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-499-507>

Поступило в редакцию 08.11.2023
Received 08.11.2023

С. А. Лысенко, академик В. Ф. Логинов

*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ
КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
КАК ОСНОВА ДОЛГОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ ПОГОДЫ**

Аннотация. Предложен новый метод исследования дальних (телеконнекционных) связей в климате Земли, основанный на выделении в глобальных метеорологических полях температуры и давления климатически сопряженных районов по характерному для них когерентному квазипериодическому колебанию. Данный метод реализован с целью отбора предикторов зимней температуры воздуха в Беларуси с заблаговременностью 2 месяца. В качестве критерия отбора предикторов рассматривалась степень когерентности давления на уровне моря и зимней температуры в Беларуси на квази-8-летнем цикле. Прогноз реализован с использованием передовой модели глубокого машинного обучения TimesNet и показал достаточно высокие для сезонного метеорологического прогноза метрики качества: коэффициент корреляции фактических и предсказанных значений температуры составил 0,66, а взвешенные макросредние значения точности и полноты прогноза в градации «норма», «выше нормы» и «ниже нормы» составили 0,61 и 0,56 соответственно.

Ключевые слова: долгосрочный метеорологический прогноз, квазипериодические колебания, когерентность метеорологических полей

Для цитирования. Лысенко, С. А. Пространственно-временная когерентность квазипериодических компонент метеорологических полей как основа долгосрочных прогнозов погоды / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 6. – С. 499–507. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-499-507>

Sergey A. Lysenko, Academician Vladimir F. Loginov

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

**SPATIAL AND TEMPORAL COHERENCE OF QUASI-PERIODIC COMPONENTS
OF METEOROLOGICAL FIELDS AS A BASIS FOR LONG-TERM WEATHER FORECASTS**

Abstract. A new method of teleconnections studding is proposed which is based on the identification of conjugate regions in the global meteorological fields of temperature and pressure by their characteristic coherent quasi-periodic oscillation. This method was implemented in order to select predictors of winter air temperature in Belarus with an advance of 2 months. The degree of coherence of sea level pressure and winter temperature in Belarus on a quasi-8-year cycle was considered as a criterion for the selection of predictors. The forecast was implemented using the advanced deep machine learning model TimesNet and showed rather high metrics of quality for seasonal meteorological forecasting: the correlation coefficient between actual and predicted temperature values was 0.66, and the weighted macro-average values of precision and recall of the forecast in the gradations “normal”, “above normal” and “below normal” were 0.61 and 0.56, respectively.

Keywords: long-term meteorological forecast, quasi-periodic oscillations, coherence of meteorological fields

For citation. Lysenko S. A., Loginov V. F. Spatial and temporal coherence of quasi-periodic components of meteorological fields as a basis for long-term weather forecasts. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 6, pp. 499–507 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-6-499-507>

Введение. В результате развития системы глобальных метеорологических наблюдений, вычислительных и информационных технологий качество численных краткосрочных (до 72 ч) и среднесрочных (до 7 дней) прогнозов погоды неуклонно повышается. На сегодняшний день численные прогнозы погоды на срок 72 ч оправдываются в 98 % случаев, а оправдываемость прогнозов на 7 суток приблизилась к 80 %, тогда как еще в 2000 г. она была на уровне 60 %. Однако при дальнейшем росте заблаговременности оправдываемость численных прогнозов погоды резко падает и для прогноза на 10 суток она составляет всего 50 %.

Долгосрочные прогнозы погоды (на месяц и сезон) в настоящее время в основном носят экспериментальный характер [1]. Гидродинамические модели атмосферы, как правило, не обеспечивают удовлетворительного качества долгосрочного метеорологического прогноза, поэтому для его составления так или иначе используются синоптико-статистические методы [2]. В последние годы данные методы все чаще применяются для коррекции детерминистских прогнозов гидродинамических моделей. При этом важно подчеркнуть, что речь в данном случае идет лишь о прогнозе среднемесячных или среднесезонных аномалий метеорологических параметров в градации ниже нормы, норма и выше нормы.

Важная роль в повышении качества долгосрочных метеорологических прогнозов отводится учету таких инерционных факторов климатической системы, как распределение температуры поверхности океана, состояние морского льда в Арктике, ледяного и снежного покрова суши. Другим источником предсказуемости метеорологических характеристик на долгие сроки является цикличность крупномасштабной циркуляции атмосферы и океана.

Попытки установления, так называемых *далеких корреляционных связей (teleconnections)* в климате Земли предпринимались неоднократно [2–5]. Однако отсутствие достаточного понимания природы и механизмов передачи сигналов в климатической системе и хаотичность самой атмосферы все еще не позволяют успешно применять эти связи в теории и практике долгосрочного и сверхдолгосрочного прогнозирования.

В настоящей работе предложен новый метод исследования дальних корреляционных связей в климате Земли, перспективный для отбора предикторов долгосрочного метеорологического прогноза. В основе метода лежит идея выделения в глобальных метеорологических полях регионов с когерентными квазипериодическими колебаниями, имеющими общую природу. Возможности метода демонстрируются на примере долгосрочного (с заблаговременностью 2 месяца) прогноза средней зимней температуры воздуха в Беларуси. В качестве предикторов прогноза температуры используются аномалии давления на уровне моря в Северной Атлантике в августе и сентябре. Прогноз реализуется с использованием передовой модели глубокого машинного обучения TimesNet, основанной на преобразовании временных рядов предикторов и прогнозируемой целевой переменной в двумерные изображения на основе периодических выборок и их анализе методами компьютерного зрения.

Анализ пространственно-временных связей метеорологических полей. Как показывают данные инструментальных метеорологических наблюдений, в изменениях температуры и давления в различных регионах Земного шара помимо суточного и годового хода присутствуют циклические колебания разной продолжительности. Наиболее известными циклами атмосферной и океанической изменчивости в Атлантико-Европейском регионе являются циклы с периодами около 8 и 60 лет. При этом периоды этих циклов не являются постоянными, а могут меняться в зависимости от региона и эпохи в диапазонах 7–10 и 50–70 лет [6–10].

Наибольшее влияние на зимнюю погоду в Беларуси оказывает *североатлантическое колебание (North Atlantic Oscillation – NAO)*, зависящее от разницы давления между двумя постоянными барическими центрами действия атмосферы в Северной Атлантике – Азорским максимумом и Исландским минимумом. Это колебание определяет интенсивность геострофического зонального переноса воздушных масс с акватории Северной Атлантики на Европейский континент в холодный период года.

В индексе NAO обнаруживаются как квази-8-летний, так и квази-60-летний циклы, причем квази-8-летний цикл NAO синхронизирован с аналогичным циклом зимней температуры воздуха в Беларуси. Данный цикл вместе с трендом объясняет около 50 % суммарной дисперсии

средней зимней температуры в Беларуси, что делает крайне привлекательной идею его использования для долгосрочного метеорологического прогноза. Сложность в реализации этой идеи состоит в том, что продолжительность этого цикла, как уже отмечалось выше, непостоянна, а амплитуда меняется в диапазоне от 1 до 2,5 °С, что делает невозможным его экстраполяцию. Однако если предположить, что квази-8-летние колебания температуры и давления во всем Атлантико-Европейском регионе имеют общую природу, то можно попытаться найти климатически сопряженные на этом цикле районы, способные выступать в качестве предикторов долгосрочного метеорологического прогноза для Беларуси.

Мерой схожести метеорологических циклов в климатически сопряженных районах может служить нормированная функция взаимной когерентности

$$\gamma_{12}(\tau) = \frac{\langle A_1(t+\tau)A_2(t) \rangle}{\left[\langle |A_1(t)|^2 \rangle \langle |A_2(t)|^2 \rangle \right]^{1/2}},$$

где A_1 и A_2 – некоторые метеорологические величины (необязательно одной физической размерности) в двух различных точках пространства \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 ; $\langle \cdot \rangle$ – усреднение по времени t ; τ – временной сдвиг колебаний A_1 и A_2 . Величина $\max_{\tau} \{\gamma_{12}(\tau)\}$ называется *степенью когерентности*: она принимает значение 0 при полной независимости колебаний в точках \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 , 1 – когда поле в точке \mathbf{r}_1 в момент времени $t + \tau$ полностью определяется полем в точке \mathbf{r}_2 в момент времени t , и промежуточные значения – при частичной когерентности колебаний.

Для выделения квази-8-летнего колебания в изменениях метеорологических величин применялся *сингулярный спектральный анализ* (Singular Spectrum Analysis – SSA). Период каждой компоненты и попарных сумм компонент сингулярного разложения временного ряда оценивался на основе анализа Фурье. В качестве искомой квазипериодической компоненты временных рядов метеовеличин выбиралась компонента, описываемая отдельным собственным вектором или парой собственных векторов с периодом в диапазоне 7–10 лет.

Поиск компонент, когерентных квази-8-летнему циклу зимней температуры воздуха в Беларуси на высоте 2 м (T_{2m}), производился в поле давления на уровне моря (Sea Level Pressure – SLP). Использовались геопространственные среднемесячные данные метеорологического центра Хэддли (архив данных HadSLP2), имеющие разрешение по долготе и широте около 5° и охватывающие период с 1850 по 2019 г. Во временном ряду SLP каждого участка земной поверхности размером 5 × 5° выполнялось выделение квази-8-летнего цикла и, при его наличии, вычислялась доля выбираемой им дисперсии и степень его когерентности аналогичному циклу T_{2m} с лагом в несколько месяцев. Регионы с наивысшей степенью когерентности циклов SLP и T_{2m} определяют выбор потенциальных лаговых предикторов долгосрочного метеорологического прогноза для территории Беларуси.

Для холодного периода года происхождение квази-8-летнего цикла в Атлантико-Европейском регионе так или иначе связано с североатлантическим колебанием (NAO), поэтому целесообразно первоначально рассмотреть проявление цикла NAO в поле зимней температуры воздуха. Соответствующие результаты представлены на рис. 1.

Как уже отмечалось выше, в изменениях NAO обнаруживается квази-8-летняя и квази-60-летняя цикличность. Первый цикл выбирает примерно 16 %, а второй – 13 % общей дисперсии NAO, что в совокупности составляет достаточно значимую величину в климате Атлантико-Европейского региона. Этот климатический сигнал отчетливо проявляется в поле приземной температуры, особенно в очагах глубокой зимней конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, Лабрадор и Ирмингера [11]. Этот факт хорошо согласуется с результатами ранее опубликованной работы [12], в которой показано, что изменения температуры океана в высоких широтах Северной Атлантики и Северных морей на 8-летнем цикле могут рассматриваться в качестве одного из основных предикторов долгосрочного прогноза погоды Европы и ледовитости Арктики в зимний период.

Физическое объяснение квази-8-летнего цикла в море Лабрадор дано в [10], где на основании численного моделирования геострофического транспорта вод в нижнем звене меридиональ-

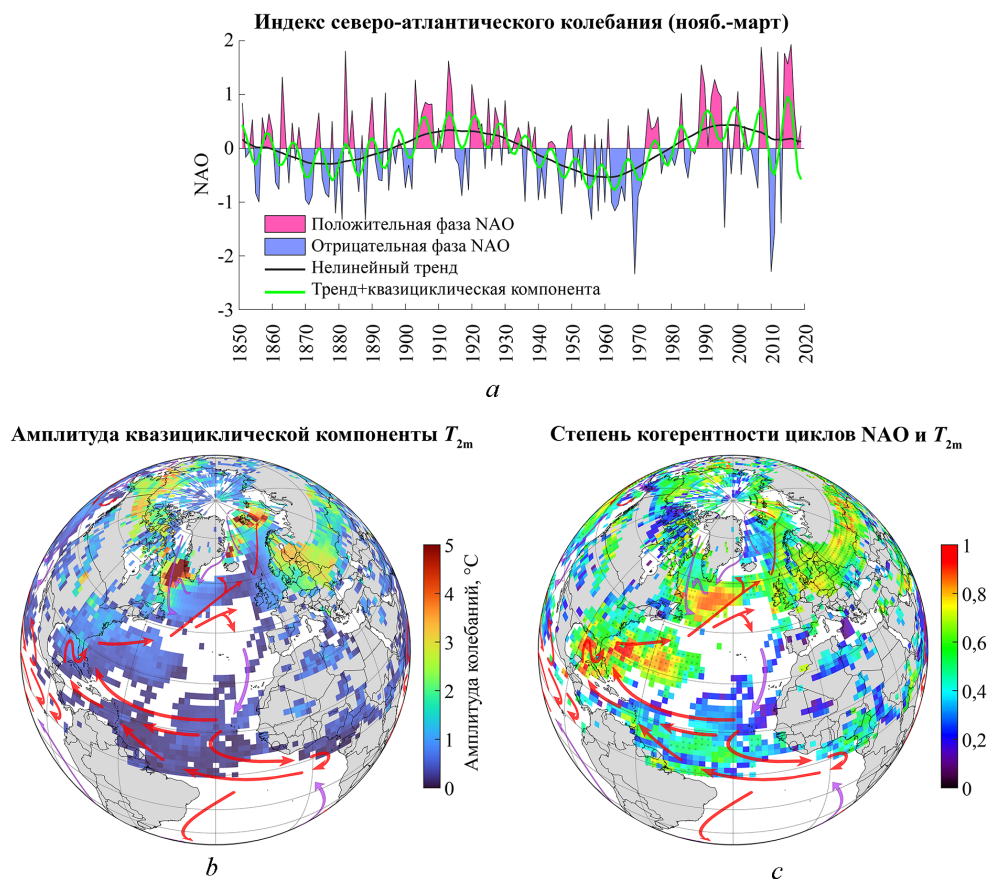


Рис. 1. Взаимосвязь индекса NAO и зимней температуры воздуха (T_{2m}) на квазипериодическом цикле 7–10 лет: a – временной ряд индекса NAO и его квазциклические компоненты; b – максимальная амплитуда колебаний T_{2m} на квази-8-летнем цикле; c – степень когерентности квази-8-летних колебаний T_{2m} и NAO (точками отмечены районы со статистически значимой когерентностью на уровне $\alpha = 0,01$)

Fig. 1. Relation between NAO index and winter air temperature (T_{2m}) on a quasi-periodic cycle of 7–10 years: a – time series of NAO index and its quasi-cyclic components; b – maximum amplitude of T_{2m} fluctuations on a quasi-8-year cycle; c – degree of coherence of quasi-8-year fluctuations of T_{2m} and NAO (dots indicate areas with statistically significant coherence at the level $\alpha = 0.01$)

ной термохалинной циркуляции вод Северной Атлантики показано, что среднее время переноса плотностных аномалий глубинных вод моря Лабрадор к субтропическим широтам ($26,5^\circ$ с. ш.) составляет 7–8 лет. Положительная и отрицательная фазы NAO формируют противоположные по знаку аномалии солёности вод в море Лабрадор, которые, в свою очередь, оказывают воздействие на транспорт холодных вод западными пограничными течениями, что создает основу автоколебательного процесса в климате Атлантико-Европейского региона.

На континентах квази-8-летний цикл зимней температуры имеет наибольшую амплитуду в районе Северной и Восточной Европы, включая и территорию Беларуси. Этот цикл статистически достоверно ($p \leq 0,01$) связан с аналогичным циклом NAO, о чем свидетельствует достаточно высокая степень их когерентности при нулевом лаге.

Еще более высокая степень когерентности NAO и T_{2m} (близкая к единице) наблюдается в области течения Гольфстрим и субполярного циклонического круговорота, в котором согласно схеме океанической циркуляции происходит взаимодействие Лабрадорского и Северо-Атлантического течений. Данный регион считается наиболее энергоактивной зоной Северной Атлантики и характеризуется интенсивным теплообменом между атмосферой и океаном [13], что, вероятно, и объясняет высокую когерентность в нем циклов NAO и T_{2m} .

Связь NAO и течения Гольфстрим ранее отмечалась в [14; 15]. В частности, в [15] было показано наличие цикла с периодом 8,3–9,5 лет в изменчивости индекса Гольфстрима (Gulf Stream

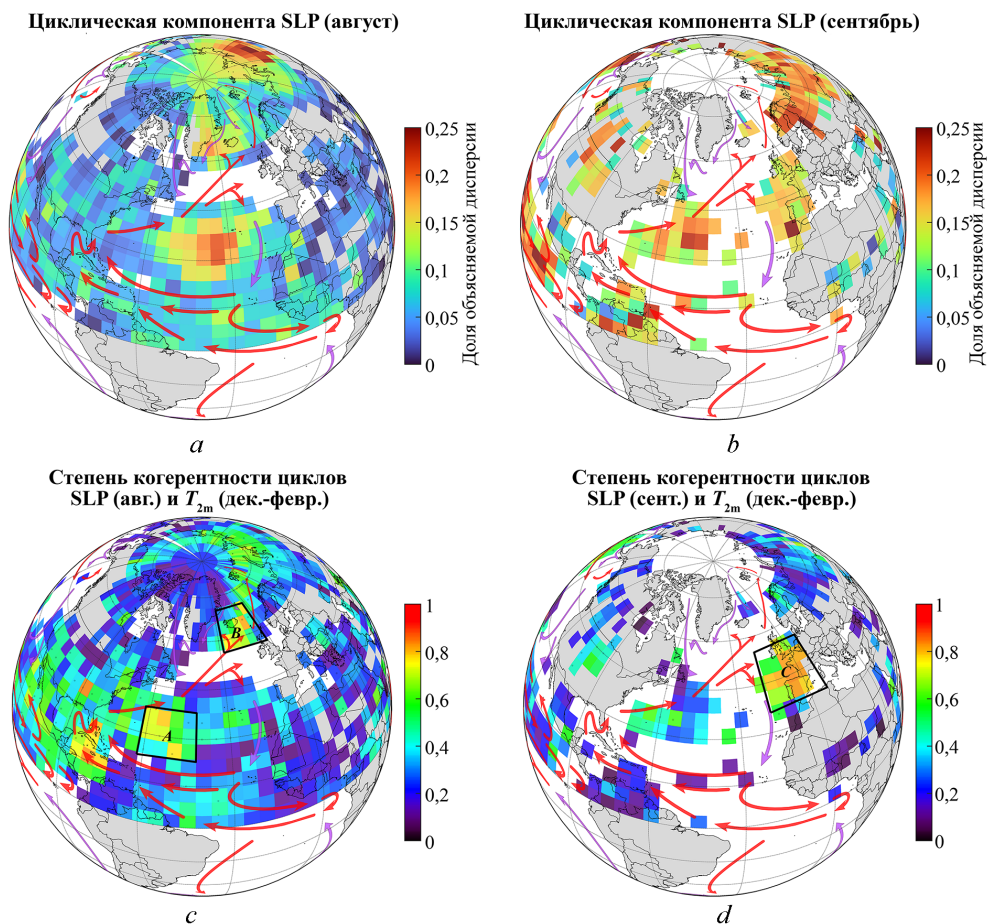


Рис. 2. Доля дисперсии давления на уровне моря в августе (*a*) и сентябре (*c*), объясняемая квази-8-летним циклом, и степень его когерентности аналогичному циклу средней зимней температуры воздуха в Беларуси (*b*, *d*)

Fig. 2. Share of sea level pressure variance in August (*a*) and September (*c*) explained by the quasi-8-year cycle and the degree of coherence of this cycle to the similar cycle of mean winter air temperature in Belarus (*b*, *d*)

North Wall), характеризующего расположение его северной границы, причем выявленный цикл также оказался близок по фазе к циклу NAO.

Теперь рассмотрим когерентность квази-8-летних циклов в полях давления и температуры с учетом временного лага (рис. 2).

На рис. 2, *a* и *b* представлены результаты расчетов доли общей дисперсии SLP в августе и сентябре, объясняемой колебанием с периодом 7–10 лет. В августе этот цикл охватывает практически все северное полушарие с максимальным проявлением в центре субтропического антициклонического круговорота Северной Атлантики, в районе Гренландии и Исландии, а также в Сибири. В указанных районах данный цикл определяет до четверти общей изменчивости SLP. Карта степени когерентности этого цикла с квази-8-летним циклом зимней температуры воздуха Беларуси (T_{2m}) позволяет выделить несколько районов Северной Атлантики, аномалии SLP в которых могут рассматриваться в качестве предикторов ее долгосрочного прогноза. К таким районам, в частности, относятся: западно-центральная область субтропического антициклонического круговорота (регион *A* на рис. 2, *c*), область Исландского минимума (регион *B*) и регион Мексиканского залива, однако последний, в силу слабого проявления в нем квази-8-летнего цикла (рис. 2, *a*), не рассматривался в качестве потенциального предиктора.

В сентябре квази-8-летний цикл SLP имеет гораздо меньший пространственный охват, чем в предыдущем месяце, однако является более мощным. Один максимум его проявления в поле SLP все также приходится на область субтропического круговорота, а второй (регион *C* на рис. 2, *d*), в отличие от августа месяца, смещается к западной Европе. Изменения SLP в этом 8-лет-

нем цикле высоко когерентны с изменениями зимней температуры в Беларуси, что обуславливает выбор еще одного ее предиктора.

В ноябре квази-8-летний цикл SLP проявляется на периферии субтропического антициклонического круговорота Северной Атлантики и в области Гренландии, однако степень его когерентности с зимней температурой воздуха в Беларуси невысока – не более 0,5.

Таким образом, для сезонного прогноза температуры воздуха в Беларуси с заблаговременностью 2 месяца можно рекомендовать по меньшей мере три перспективных предиктора: аномалии давления на уровне моря в районах, отмеченных боксами *A*, *B* и *C* на рис. 2, *c* и *d*.

Модель сезонного прогноза температуры воздуха. К настоящему времени разработано большое количество моделей прогноза временных рядов с учетом лаговых предикторов, начиная от достаточно простых и интерпретируемых аддитивных моделей типа Prophet и NeuralProphet и заканчивая глубокими нейронными сетями, такими как DeepAR, N-BEATS, N-HiTS и Temporal Fusion Transformer. Все они хорошо описаны в специализированных интернет-источниках и реализованы в известных библиотеках глубокого машинного обучения, таких как PyTorch Forecasting (2020), Darts (2020) и NeuralForecast (2022).

Достаточно хорошим кандидатом на роль модели прогноза временных рядов, включающих общие квазистационарные колебания, является вышедшая в апреле 2023 г. модель TimesNet, которая достигает самых передовых результатов при решении таких задач анализа временных рядов, как прогнозирование, классификация, обнаружение аномалий и автозаполнение пропусков.

Архитектура модели TimesNet приведена на рис. 3. В отличие от предыдущих моделей прогноза многомерных временных рядов, она использует архитектуру на основе сверточных нейронных сетей по типу Inception, применяемых в задачах компьютерного зрения. Модель способна распознавать периодические компоненты целевой переменной и ее предикторов и учитывать их внутрипериодные и межпериодные взаимосвязи.

Модель TimesNet обучалась на данных наблюдений за температурой воздуха в Беларуси и сеточных данных HadSLP2 по давлению на уровне моря за период с 1933 по 2001 г. Период с 2002 по 2016 г. использовался для оптимизации гиперпараметров модели, а период с 2017 по 2023 г. – для тестирования оптимизированной модели. При этом необходимо отметить, что данные HadSLP2, имеющиеся в свободном доступе, заканчиваются 2019 г. Начиная с 2020 г. для вычисления предикторов температуры воздуха в Беларуси авторами используются данные реанализа NCEP-NCAR месячного разрешения. Временные ряды предикторов, вычисляемых с применением двух отмеченных выше комплектов данных, «сшивались» методом линейной регрессии на основе общего для них периода 1948–2019 гг.

Результаты сезонного прогноза температуры на основе выявленных предикторов и модели TimesNet для обучающих, валидационных и тестовых данных представлены на рис. 4. Областью

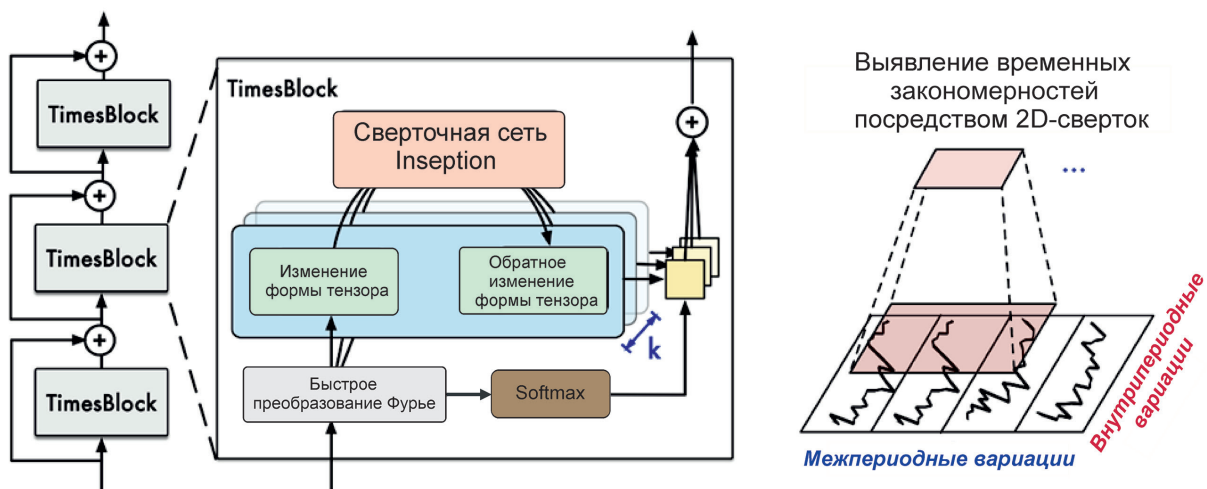


Рис. 3. Общая структура модели TimesNet

Fig. 3. General structure of TimesNet model

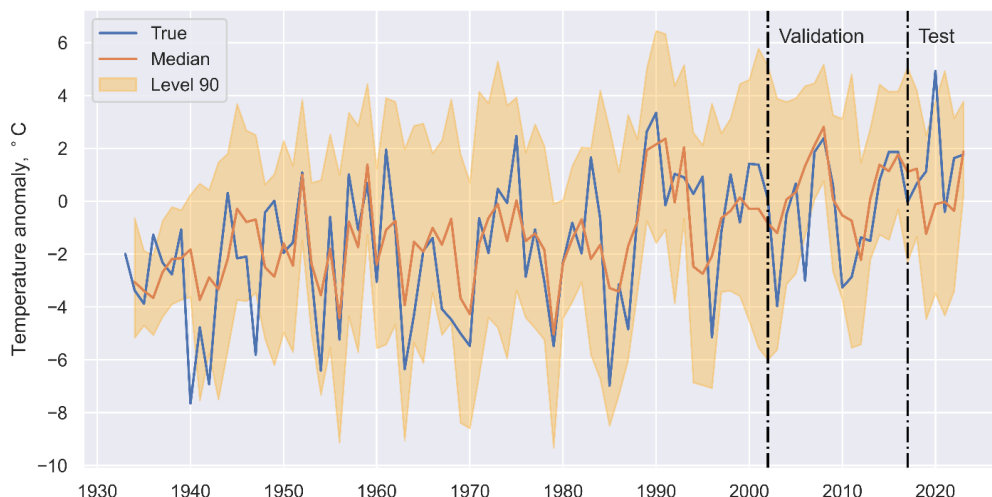


Рис. 4. Фактические и предсказанные моделью TimesNet значения средней зимней температуры воздуха в Беларуси с лагом 2 месяца

Fig. 4. Actual and predicted by TimesNet model values of mean winter air temperature in Belarus with a lag of 2 months

с заливкой показан 90 %-й межквартильный размах прогноза. В целом для всего временного ряда достигается коэффициент корреляции фактических и предсказанных значений температуры 0,66. Прогноз для тестовой части ряда также оказался вполне удовлетворительным, за исключением рекордно теплой зимы 2019–2020 гг., когда температура воздуха в Беларуси устойчиво превышала нулевую отметку на протяжении всего зимнего периода.

Сезонный прогноз температуры, как правило, дается в градациях ниже нормы, норма и выше нормы, поэтому рассмотрим оценки качества такого прогноза моделью TimesNet. Под нормой будем понимать значения температуры, расположенные между 33-м и 66-м перцентилями ее распределения. Аномалии ниже и выше нормы соответственно будем относить к значениям температуры ниже 33-го и выше 66-го перцентилей. Таким образом в каждую градацию попадает примерно одинаковое количество точек (33 % от их общего количества).

Метрики качества сезонного прогноза температуры в указанной градации приведены в таблице. Точность многоклассового прогноза можно интерпретировать как долю объектов, правильно отнесенных моделью к данному классу, из общего числа объектов этого класса, спрогнозированных моделью. Метрика «полнота» показывает, какую долю объектов данного класса модель спрогнозировала правильно. F1-мера – это среднее гармоническое значение точности и полноты, являющееся сбалансированной мерой как ложноположительных, так и ложноотрицательных результатов.

Метрики производительности модели TimesNet в задаче прогноза средней зимней температуры в градации ниже нормы, норма и выше нормы

Performance metrics of the TimesNet model in the task of forecasting average winter temperature in the gradations below normal, normal and above normal

Аномалия Anomaly	Точность Precision	Полнота Recall	F1-мера F1-score
Ниже нормы	0,70	0,53	0,60
Норма	0,43	0,67	0,52
Выше нормы	0,70	0,47	0,56
Макрометрики	0,61	0,56	0,56

Для всех классов температурной аномалии вычисленные метрики качества прогноза превосходят аналогичные метрики для случая простого угадывания. Взвешенные макросредние метрики показывают, что модель достоверно спрогнозировала 56 % аномалий температуры, 61 % данных моделью прогнозов соответствуют действительности. При этом точность прогноза ано-

малый температуры выше и ниже нормы составила 70 %, что более чем в 2 раза превышает точность случайного угадывания.

Закключение. Предложены новые подходы к выделению потенциальных лаговых предикторов для долгосрочного метеорологического прогноза на основе анализа степени пространственно-временной когерентности устойчивого во времени квази-8-летнего колебания метеорологических полей. Проявление данного цикла в поле приземной температуры связано с очагами глубокой конвекции в морях Северной Атлантики, являющейся неотъемлемой частью Атлантической меридиональной термохалинной циркуляции.

Результаты исследования показывают, что можно выделить по меньшей мере три района Северной Атлантики, в которых квази-8-летнее колебание с лагом 2–3 месяца синхронизировано с колебанием зимней температуры в Беларуси: западная и центральная область субтропического антициклонического круговорота, область Исландского минимума и побережье Западной Европы. Аномалии давления на уровне моря в указанных регионах Атлантики для августа и сентября являются эффективными предикторами зимней температуры в Беларуси. Соответствующий прогноз реализован на основе передовой нейросетевой модели прогноза временных рядов TimesNet.

Дальнейшее повышение качества долгосрочного и сверхдолгосрочного прогнозирования (заблаговременность более сезона) температуры может быть достигнуто за счет учета еще одного мощного цикла в климате Земли – с периодом около 60 лет. Этот цикл отчетливо проявляется в индексе атлантической мультидекадной осцилляции (АМО) и индексе североатлантического колебания (NAO). Поскольку последний определяет траектории циклонов, и как следствие, и погодные условия на территории Европы в зимний период, то знак его изменения в квази-60-летнем цикле может рассматриваться в качестве категориального признака при долгосрочном прогнозе зимней температуры в Беларуси.

Еще одним направлением повышения качества долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов температуры можно указать использование так называемых *глобальных моделей* прогноза временных рядов, способных обучаться сразу на большой совокупности однотипных временных рядов. В нашем случае – это данные наблюдений за температурой воздуха на множестве метеорологических станций Беларуси. Такие модели, как правило, обладают хорошей способностью выявления общих закономерностей и зависимостей, присущих исследуемым динамическим процессам, и наиболее удобны в практическом применении, поскольку позволяют составлять прогноз сразу для нескольких пунктов наблюдений.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № X23РНФ-122).

Acknowledgments. The study was carried out with financial support from the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant no. X23РНФ-122).

Список использованных источников

1. Долгосрочные метеорологические прогнозы в Гидрометцентре России / Р. М. Вильфанд [и др.] // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019. – № 4 (374). – С. 12–36.
2. Долгосрочные метеорологические прогнозы / Н. А. Багров [и др.]. – Л., 1985. – 248 с.
3. Dominant imprint of Rossby waves in the climate network / Y. Wang [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2013. – Vol. 111. – Art. 138501. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.111.138501>
4. Review of tropical-extratropical teleconnections on intraseasonal time scales / C. Stan [et al.] // Rev. Geophys. – 2017. – Vol. 55, N 4. – P. 902–937. <https://doi.org/10.1002/2016rg000538>
5. The impact of strong El Niño and La Niña events on the North Atlantic / S. C. Hardiman [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 2019. – Vol. 46, N 5. – P. 2874–2883. <https://doi.org/10.1029/2018gl081776>
6. Gastineau, G. Influence of the North Atlantic SST variability on the atmospheric circulation during the twentieth century / G. Gastineau, C. Frankignoul // J. Climate. – 2015. – Vol. 28, N 4. – P. 1396–1416. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00424.1>
7. Seip, K. L. The North Atlantic Oscillations: cycle times for the NAO, the AMO and the AMOC / K. L. Seip, Ø. Grøn, H. Wang // Climate. – 2019. – Vol. 7, N 3. – Art. 43. <https://doi.org/10.3390/cli7030043>
8. Rahmstorf, S. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years / S. Rahmstorf // Nature. – 2002. – Vol. 419, N 12. – P. 207–214. <https://doi.org/10.1038/nature01090>
9. Полонский, А. Б. Североатлантическое колебание и бюджет тепла верхнего слоя Северной Атлантики / А. Б. Полонский, П. А. Сухонос // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2019. – № 4. – С. 67–100. <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2019-4-67-100>

10. Recent slowing of Atlantic overturning circulation as a recovery from earlier strengthening / L. Jackson [et al.] // *Nature Geosci.* – 2016. – Vol. 9, N 7. – P. 518–522. <https://doi.org/10.1038/ngeo2715>
11. Федоров, А. М. Локализация областей глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, Лабрадор и Ирмингера / А. М. Федоров, И. Л. Башмачников, Т. В. Белоненко // *Вестн. СПбГУ. Науки о Земле.* – 2018. – Т. 63, вып. 3. – С. 345–362. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.306>
12. Skillful prediction of northern climate provided by the ocean / M. Årthun [et al.] // *Nature Communications.* – 2017. – Vol. 8. – Art. 15875. <https://doi.org/10.1038/ncomms15875>
13. Нестеров, Е. С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан / Е. С. Нестеров. – М., 2013. – 144 с.
14. The relation between the North Atlantic Oscillation and SSTs in the North Atlantic basin / W. Wang [et al.] // *J. Clim.* – 2004. – Vol. 17, N 24. – P. 4752–4759. <https://doi.org/10.1175/jcli-3186.1>
15. McCarthy, G. D. Gulf stream variability in the context of quasi-decadal and multidecadal atlantic climate variability / G. D. McCarthy, T. M. Joyce, S. A. Josey // *Geophys. Res. Lett.* – 2018. – Vol. 45, N 20. – P. 11257–11264. <https://doi.org/10.1029/2018gl079336>

References

1. Vilfand R. M., Zaripov R. B., Kiktev D. B., Kruglova E. N., Kryjov V. N., Kulikova I. A., Tischenko V. A., Tolsyach M. A., Khan V. M. Long-range forecasting at Hydrometeorological Center of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological Research and Forecasting*, 2019, no. 4 (374), pp. 12–36 (in Russian).
2. Bagrov N. A., Kondratovich K. V., Ped D. A., Ugryumov A. I. *Long-term meteorological forecasts*. Leningrad, 1985. 248 p. (in Russian).
3. Wang Y., Gozolchiani A., Ashkenazy Y., Berezin Y., Guez O., Havlin Sh. Dominant imprint of Rossby waves in the climate network. *Physical Review Letters*, 2013, vol. 111, art. 138501. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.111.138501>
4. Stan C., Straus D. M., Frederiksen J. S., Lin H., Maloney E. D., Schumacher C. Review of tropical-extratropical teleconnections on intraseasonal time scales. *Reviews of Geophysics*, 2017, vol. 55, no. 4, pp. 902–937. <https://doi.org/10.1002/2016rg000538>
5. Hardiman S. C., Dunstone N. J., Scaife A. A., Smith D. M., Ineson S., Lim J., Fereday D. The impact of strong El Niño and La Niña events on the North Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 2019, vol. 46, no. 5, pp. 2874–2883. <https://doi.org/10.1029/2018gl081776>
6. Gastineau G., Frankignoul C. Influence of the North Atlantic SST variability on the atmospheric circulation during the twentieth century. *Journal of Climate*, 2015, vol. 28, no. 4, pp. 1396–1416. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00424.1>
7. Seip K. L., Grøn Ø., Wang H. The North Atlantic Oscillations: cycle times for the NAO, the AMO and the AMOC. *Climate*, 2019, vol. 7, no. 3, art. 43. <https://doi.org/10.3390/cli7030043>
8. Rahmstorf S. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature*, 2002, vol. 419, no. 12, pp. 207–214. <https://doi.org/10.1038/nature01090>
9. Polonsky A. B., Sukhonos P. A. North Atlantic Oscillation and upper layer heat balance in the North Atlantic. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*, 2019, no. 4, pp. 67–100 (in Russian). <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2019-4-67-100>
10. Jackson L. C., Peterson K. A., Roberts C. D., Wood R. A. Recent slowing of Atlantic overturning circulation as a recovery from earlier strengthening. *Nature Geoscience*, 2016, vol. 9, no. 7, pp. 518–522. <https://doi.org/10.1038/ngeo2715>
11. Fedorov A. M., Bashmachnikov I. L., Belonenko T. V. Localization of areas of deep convection in the Nordic seas, the Labrador sea and the Irminger sea. *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle = Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 345–362 (in Russian). <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.306>
12. Årthun M., Eldevik T., Viste E., Drange H., Furevik T., Johnson H. L., Keenlyside N. S. Skillful prediction of northern climate provided by the ocean. *Nature Communications*, 2017, vol. 8, art. 15875. <https://doi.org/10.1038/ncomms15875>
13. Nesterov E. S. *North Atlantic Oscillation: atmosphere and ocean*. Moscow, 2013. 144 p. (in Russian).
14. Wang W., Anderson B. T., Kaufmann R. K., Myneni R. B. The Relation between the North Atlantic Oscillation and SSTs in the North Atlantic Basin. *Journal of Climate*, 2004, vol. 17, no. 24, pp. 4752–4759. <https://doi.org/10.1175/jcli-3186.1>
15. McCarthy G. D., Joyce T. M., Josey S. A. Gulf Stream variability in the context of quasi-decadal and multidecadal atlantic climate variability. *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45, no. 20, pp. 11257–11264. <https://doi.org/10.1029/2018gl079336>

Информация об авторах

Лысенко Сергей Александрович – д-р физ.-мат. наук, профессор, директор. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lysenko.nature@gmail.com.

Логин Владимир Федорович – академик, д-р географ. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nature@ecology.basnet.by.

Information about the authors

Lysenko Sergey A. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Director. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lysenko.nature@gmail.com.

Loginov Vladimir F. – Academician, D. Sc. (Geography), Professor, Chief Researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nature@ecology.basnet.by.