

КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ
CLIMATIC RESOURCES
КЛІМАТЫЧНЫЯ РЭСУРСЫ

УДК 551.58

Л. М. Болотько, А. М. Людчик, С. Д. Умрейко

Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, e-mail: liudchikam@tut.by

ДИНАМИЧНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ НОРМЫ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ ДЛЯ г. МИНСКА

Аннотация. Динамические климатические нормы температуры, скорости ветра, относительной влажности и облачности рассчитаны на основании данных наблюдений на Минской метеорологической станции за период 1985–2019 гг. с использованием кубической модели многолетнего тренда. Результаты для большинства сезонов заметно отличаются от прогноза, полученного ранее на основании данных за 1985–2015 гг. и квадратичной модели тренда. Сделан вывод о неудачной модели тренда, использованной в проведенных ранее расчетах. Обсуждаются возможности и способы построения удовлетворительной модели тренда, роль оценки статистической значимости в выборе модели и прогностические возможности динамической климатической нормы.

Ключевые слова: динамическая климатическая норма, температура воздуха, скорость ветра, влажность, облачность, многолетний тренд

L. M. Bolotsko, A. M. Liudchik, S. D. Umreiko

National Ozone Monitoring Research Centre of the Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: liudchikam@tut.by

DYNAMIC CLIMATIC NORMALS OF METEOROLOGICAL PARAMETERS FOR MINSK

Annotation. Dynamic normals of temperature, wind speed, relative humidity, and cloud cover have been computed employing a multiyear trend cubic model on the basis of observation data collected at the Minsk Meteorological Station for the period of 1985–2019. The results for most seasons differ substantially from the forecast obtained previously on the basis of data for 1985–2015 and the quadratic trend model. The conclusion is drawn about the inadequacy of the trend model used in earlier calculations. The possibilities and methods of constructing a satisfactory trend model, role of statistical significance estimation in model selection, and prognostic capabilities of the dynamic climate normal are discussed.

Keywords: dynamic normal, air temperature, wind speed, humidity, cloud cover, multiyear trend

Л. М. Балацько, А. М. Людчык, С. Дз. Умрэйка

Нацыянальны навукова-даследчы цэнтр маніторынгу азонасферы Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта, Мінск, Беларусь, e-mail: liudchikam@tut.by

ДЫНАМІЧНЫЯ КЛІМАТЫЧНЫЯ НОРМЫ МЕТЭАПАРАМЕТРАЎ ДЛЯ Г. МІНСКА

Анатацыя. Дынамічныя кліматычныя нормы тэмпературы, хуткасці ветру, адноснай вільготнасці і воблачнасці разлічаны на аснове дадзеных назіранняў, атрыманых на Мінскай метэаралагічнай станцыі ў 1985–2019 гг. з выкарыстаннем кубічнай мадэлі шматгадовага тренду. Вынікі для большасці сезонаў прыкметна адрозніваюцца ад прагнозу, які грунтаваўся на дадзеных за 1985–2015 гг. і зыходзіў з квадратычнай мадэлі тренду. Зроблена выснова аб няўдалай мадэлі тренду, выкарыстанай у папярэдніх разліках. Абмяркоўваюцца магчымасці і шляхі стварэння здавальняючай мадэлі тренду, роля ацэнкі статыстычнай значнасці ў выбары мадэлі і прагнастычныя магчымасці дынамічнай кліматычнай нормы.

Ключавыя словы: дынамічная кліматычная норма, тэмпература паветра, хуткасць ветру, вільготнасць, воблачнасць, шматгадовы тренд

Введение. Одной из основных характеристик климата являются климатические нормы метеопараметров, которые, согласно ортодоксальному определению Всемирной метеорологической организации (ВМО, 1933), определяются по средним значениям, рассчитанным за период в 30 лет. Следующее тридцатилетие позволяет рассчитать новые климатические нормы, сравнить с предыдущими и сделать вывод об изменении климата, а также количественно оценить

величину этого изменения. Вероятно, предложенный алгоритм мог удовлетворительно работать до 20-го столетия, однако уже в середине прошлого века появилась критика принятого определения климатической нормы (подробности и ссылки приведены в [1]). В последние десятилетия, когда мы являемся свидетелями весьма быстрых и резких изменений климата, стало абсолютно очевидным, что такое определение не удовлетворяет потребностям науки и практики. Это обстоятельство не осталось незамеченным и уже во второй половине 20-го века был предложен ряд усовершенствований определения климатической нормы [1], детализирующих описание быстро меняющейся ситуации. Нам представляется, что наиболее удачным является подход К. Я. Винникова с соавторами [2–5], сформулировавшими концепцию «динамической» климатической нормы. Согласно [2–5], наблюдаемое в данный момент времени t значение метеопараметра $y(t)$ следующее:

$$y(t) = Y(t) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где $Y(t)$ – динамическая климатическая норма метеопараметра, $\varepsilon(t)$ – случайные кратковременные флуктуации относительно нормы. Это стандартное представление результатов измерений, особенности заключаются в определении нормы.

Динамическая климатическая норма является суммой двух слагаемых:

$$Y(t) = A(t) + Tr(t). \quad (2)$$

Здесь первое слагаемое представляет собой циклическую часть, повторяющуюся из года в год, второе – многолетний тренд, в общем случае зависящий от времени (в том числе и от времени суток). Таким образом, динамическая климатическая норма допускает трансформацию во времени при переходе от одного года к другому, т. е. позволяет отразить изменения климата в течение периода, который используется для ее определения. Это одно из существенных достоинств нового определения.

С некоторой вероятностью экстраполяция полученных результатов позволяет судить об ожидаемых изменениях в будущем. Условия обеспечения качества такой экстраполяции обсуждаются далее.

Обе составляющих нормы представляются в виде произведения конечных сумм рядов Фурье с основными периодами, равными длительности года и суток. В частности, если предполагается линейная модель тренда,

$$Tr(t) = B(t)t,$$

где $B(t)$ – произведение упомянутых сумм рядов Фурье. В случае квадратичной модели

$$Tr(t) = B(t)t + C(t)t \cdot t,$$

где $C(t)$ – аналогичное разложение. В данной публикации используется кубическая модель тренда. Параметры модели (коэффициенты разложений функций $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ и $D(t)$) определяются посредством минимизации отклонений модели нормы от измеренных значений на протяжении всего рассматриваемого периода:

$$\sum_t [y(t) - A(t) - B(t)t - C(t)t \cdot t - D(t)t \cdot t \cdot t]^2 \rightarrow \min.$$

Более подробные сведения о деталях расчетов приведены в работах [6, 7]. Следует заметить, что представление нормы в виде суммы ограниченного ряда Фурье полностью устраняет существующую в рамках традиционных подходов проблему наличия пропусков в данных наблюдений и неравномерности их рядов: аппроксимация данных наблюдений известной функцией не критична по отношению к названной проблеме [4].

Нельзя сказать, что концепция динамической климатической нормы абсолютно совершенна. Основной проблемой при ее реализации является необходимость задания модели многолет-

него тренда. Это сложная задача, и ее неудачное решение может служить источником ошибок и недоразумений при интерпретации результатов. Пожалуй, формирование модели тренда – самый важный элемент расчетов с использованием названной концепции.

В работах [1, 8, 9] на основании данных наблюдений за период 1985–2015 гг. были рассчитаны динамические климатические нормы температуры воздуха, скорости ветра, абсолютной влажности и облачности для всех областных центров Беларуси. К настоящему времени стали доступными данные за последующие 4 года. Это позволяет оценить эффективность использованной модели тренда для прогноза будущего поведения названных метеопараметров, проверить корректность выработанного ранее прогноза и сделать выводы о наиболее вероятном поведении метеопараметров в ближайшем будущем.

Ниже приведены результаты применения концепции динамической климатической нормы к анализу наблюдений за названными выше метеопараметрами на метеорологической ст. Минск. Обсуждаются проблемы моделирования многолетнего тренда и предсказательные возможности методики. Именно качество получаемого прогноза имеет решающее значение в эпоху быстрого изменения климата. Результаты анализа для других областных городов будут представлены в следующих публикациях.

Исходные данные и детали расчета. В качестве исходных использованы данные наблюдений на ст. Минск за период 1985 – середина 2019 г. (всего около 100 000 измерений). В рядах данных присутствуют пропуски нескольких месяцев. Авторы полагают, что это существенно не повлияло на качество результатов.

Разложение циклической части всех норм (функция $A(t)$) содержит произведения гармоник с периодами 1, 1/2 и 1/3 года и 1 и 1/2 суток. Для описания многолетнего тренда (функции $B(t)$, $C(t)$ и $D(t)$) использованы разложения в виде произведений гармоник с периодами 1, 1/2 года и 1, 1/2 суток. Всего разложение нормы содержит 124 слагаемых. Вполне вероятно, что среди них присутствует много несущественных, однако на данном этапе выявление значимости отдельных членов не является целью исследования. Более того, авторы ограничиваются только графическим представлением результатов и не приводят полученные коэффициенты разложения для обсуждаемых климатических норм. Подробные данные расчетов могут быть представлены по запросу liudchikam@tut.by.

Температура воздуха. На рис. 1 показан суточный ход нормы температуры в разные сезоны 1988, 2015 и 2020 гг., рассчитанный, как и в [1], на 15 января, 15 апреля, 15 июля и 15 октября каждого года. Рассчитывались также нормы суточного хода и других метеопараметров. На эти же даты определялись многолетние тренды метеопараметров, за исключением сезонных трендов температуры (рис. 2), где проводилось усреднение тренда по всему сезону. Причина в том, что на данном рисунке сравниваются нормы сезонных трендов со средними значениями наблюдений в каждом сезоне, а тренды, отнесенные к серединам сезонов, несколько отличаются от среднесезонных и сравнение было бы некорректным. Отметим, что 2020-й год выпадает из интервала, использованного для расчетов нормы, и относится к области прогноза. Поскольку, согласно наблюдениям метеорологов, в сезон декабрь 2019 – февраль 2020 г. зима так и не наступила, прогноз оказался качественно верным.

Зимой, весной и летом дневные и ночные температуры со временем растут. В последние годы летний рост незначителен. Осенью тренд нормы температуры после 2015 г. показывает медленное ее понижение. Эти результаты не совпадают с прогнозом, сделанным в [1] на основании наблюдений за более короткий период 1985–2015 гг. и при использовании квадратичной модели тренда. Тогда отмечалось снижение после 2000 г. зимних температур и рост осенних. Как будет показано далее, причиной несоответствия оказалась использованная в [1] недостаточно «гибкая» модель многолетнего тренда.

На рис. 2 приведены рассчитанные многолетние тренды температуры воздуха в различные сезоны, объясняющие «странное» поведение ее суточного хода со временем. Здесь представлены тренды среднесезонных температур и их сравнение с усредненными по сезонам наблюдениями. По сравнению с результатами, представленными в [1], тренды сезонных температур

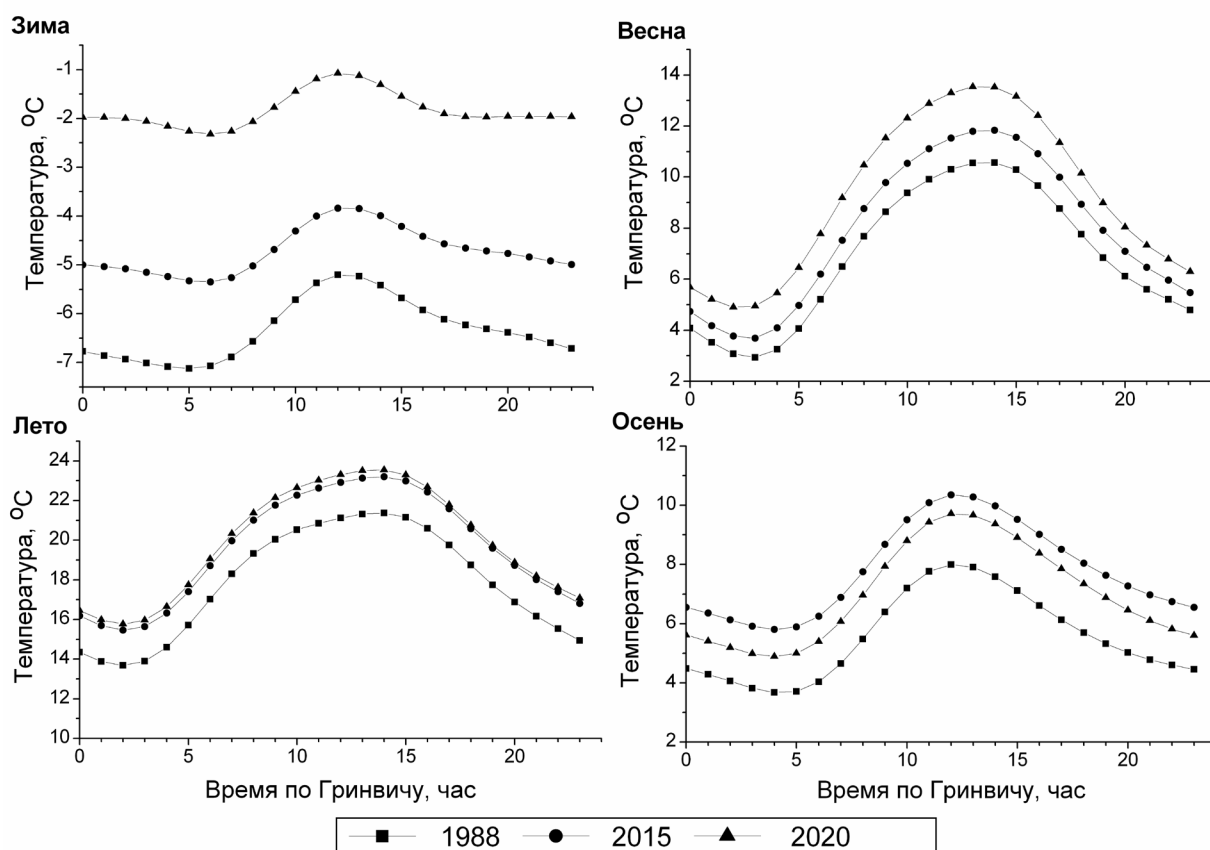


Рис. 1. Суточный ход нормы температуры в разные сезоны в 1988, 2015 и 2020 гг.

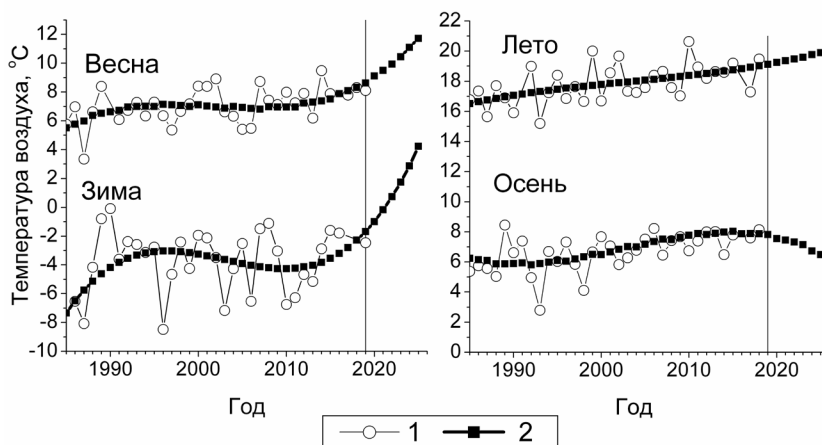


Рис. 2. Среднесезонные температуры воздуха (1) и их многолетние тренды (2). Вертикальная черта отделяет область прогноза

практически не изменились за использованный в [1] период наблюдений. Наибольшие различия произошли только для зимнего сезона. Однако несколько увеличилась прогнозная скорость роста температуры в весенний и летний периоды. Существенно изменился прогноз будущего поведения температуры в осенний и особенно зимний сезоны. Так, ранее предсказанный рост осенних температур не оправдался после 2015 г. и сменился их постепенным снижением. А прогнозирувавшееся похолодание зимнего сезона, согласно новым расчетам, продолжалось только

приблизительно до 2010 г. и сменилось резким потеплением. Как уже отмечалось, это результат использования в [1] модели тренда с недостаточным числом степеней свободы, не способной учесть сложные трансформации анализируемых метеопараметров в течение периода наблюдений.

Скорость ветра. Данные наблюдений показывают заметное снижение скорости ветра к 2015 г. и последующее ее увеличение. Это же подтверждают и рассчитанные многолетние тренды (рис. 3). После 2015 г. норма скорости ветра зимой, весной и летом начинает быстро расти. Исключением является осенний сезон: в течение всего обработанного периода норма скорости ветра линейно снижается, однако не так быстро, как предсказывали расчеты в [1]. Форма кривых суточного хода скорости ветра в различные сезоны хорошо согласуется с приведенной в [8].

Влажность. Рассчитанные многолетние тренды относительной влажности представлены на рис. 4. В работах [1, 9] определялись климатические нормы не относительной, а абсолютной влажности, влияющей на скорость химических реакций паров воды и их производных с загрязнителями воздуха. Поэтому для выявления различий, обусловленных выбором модели тренда, авторами были проведены расчеты нормы относительной влажности с использованием также и квадратичной модели. Заметные различия в результатах относятся к периоду после 2010 г.

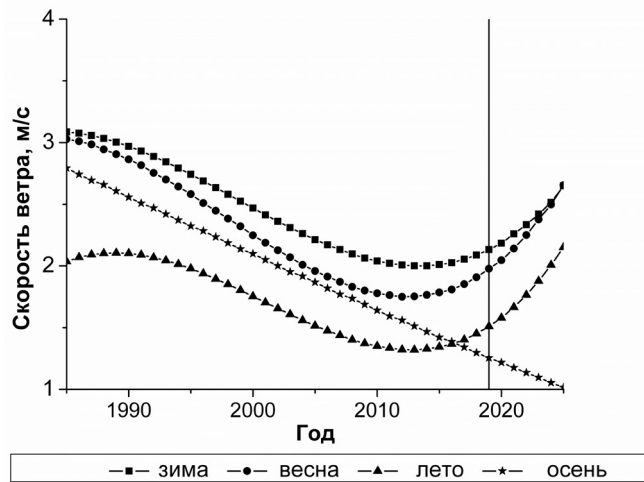


Рис. 3. Тренды среднесуточной скорости ветра в разные сезоны. Вертикальная линия отделяет область прогноза

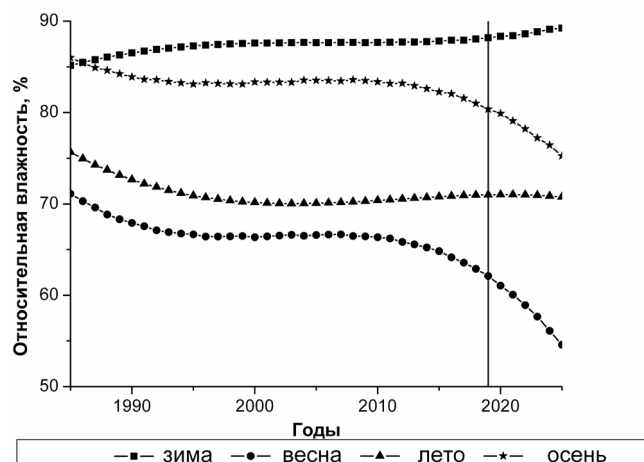


Рис. 4. Многолетние тренды относительной влажности в разные сезоны. Вертикальная черта отделяет область прогноза

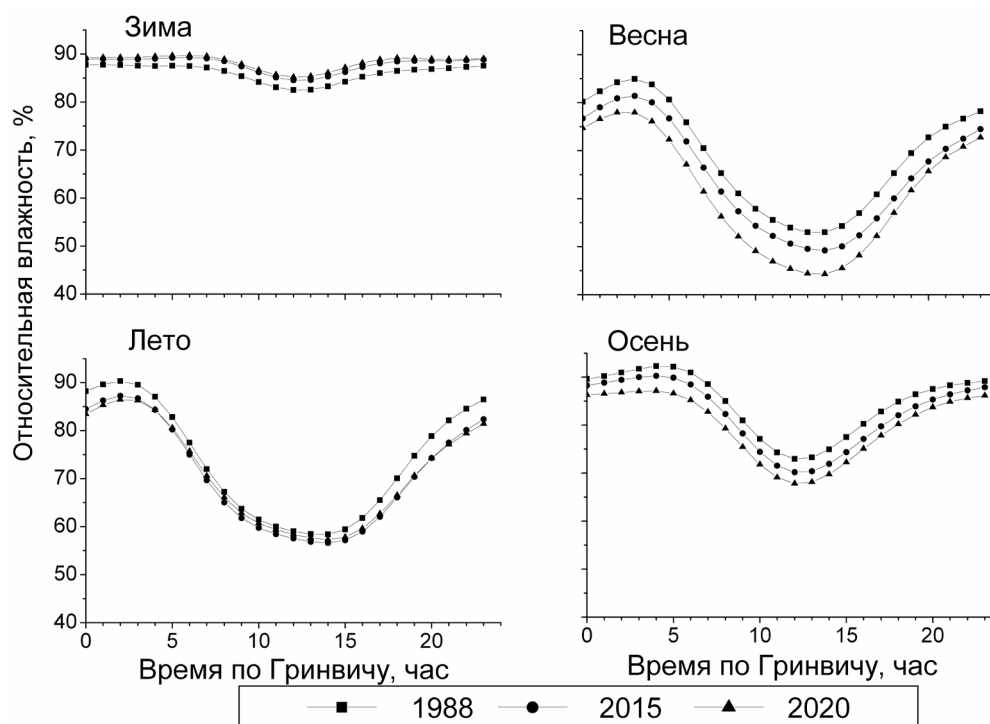


Рис. 5. Суточный ход относительной влажности в разные сезоны 1988, 2015 и 2020 гг.

в зимний, весенний и осенний сезоны. В летний период совершенствование модели тренда не приводит к существенному изменению результатов. Зимой снижение влажности после 2010 г. в рамках квадратичной модели сменилось слабым ростом, весной рост сменился на быстрое уменьшение влажности. Осенью заметно более быстрое уменьшение влажности по сравнению с квадратичной моделью тренда.

Суточный ход относительной влажности в разные сезоны и годы представлен на рис. 5. Влажность незначительно снижается во все сезоны, кроме зимнего, что полностью согласуется с поведением многолетних сезонных трендов (рис. 4). Относительная влажность сильно зависит от температуры воздуха. Именно поэтому она заметно уменьшается в дневное время во все сезоны, кроме зимнего.

Абсолютная влажность. Абсолютная влажность по сравнению с относительной в меньшей степени зависит от температуры, которая влияет на эффективность испарения влаги растительностью и с поверхности земли – процесс, в основном определяющий концентрацию молекул воды в воздухе. Рассчитанные многолетние тренды приведены на рис. 6. По сравнению с расчетами, базировавшимися на квадратичной модели тренда [1, 9] и показывавшими падение влажности зимой к 2015 г., в рамках кубической модели наблюдается рост после 2010 г. Весной оба расчета демонстрируют слабый рост влажности и практически не отличаются. Летом влажность стабилизировалась к 2019 г., хотя квадратичная модель показывала рост. Осенью влажность снижается после 2010 г. (квадратичная модель тренда показывала рост). В [1] уже отмечалось качественное подобие годовых ходов и многолетних трендов температуры и абсолютной влажности. Расчеты с модифицированной моделью тренда также демонстрируют такое подобие. Суточный ход абсолютной влажности менее выражен по сравнению с относительной.

Облачность. Балльность облачности – один из метеорологических параметров, определяющих уровень солнечной радиации у поверхности земли, от которого существенно зависит эффективность химических реакций в загрязненном приземном воздухе. Балльность облачности тесно связана с относительной влажностью воздуха в приземном слое и вертикальной устойчивостью атмосферы. В годовом ходе облачности проявляются локальные минимумы в конце весны и в конце лета, коррелирующие с минимумами относительной влажности [9].

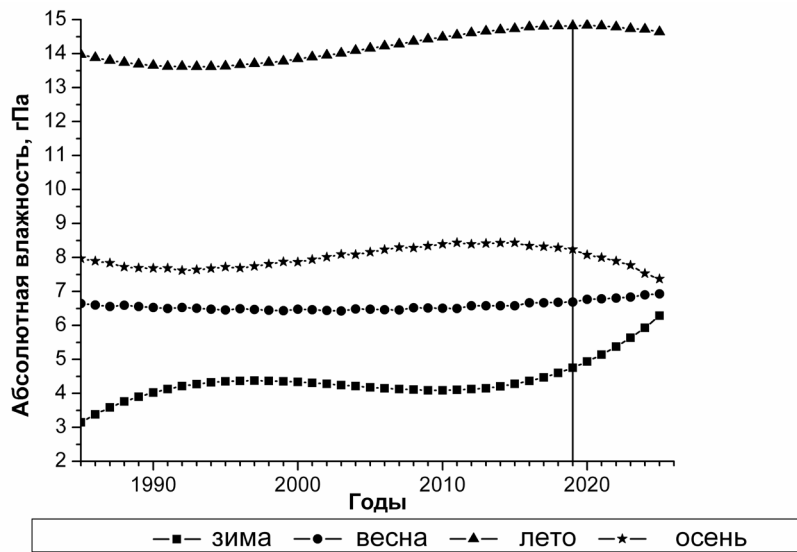


Рис. 6. Многолетние тренды абсолютной влажности в разные сезоны. Вертикальная линия отделяет область прогноза

Суточный ход облачности в разные сезоны показан на рис. 7. Зимой она почти не меняется в течение суток, точно так же как и относительная влажность. Весной и летом максимум приходится на послеполуденное время, осенью проявляется слабо, а зимой почти незаметен.

На рис. 8 представлен многолетний тренд облачности в разные сезоны. Очевидно, что зимняя кривая в области прогноза ведет себя неправильно, поскольку превышает максимально возможные значения при приближении к 2025 г. Более подробно проблема корректности прогноза обсуждается в следующем разделе.

Выбор модели тренда и достоверность прогноза. Как отмечалось в предыдущих разделах, качество результатов расчетов динамических климатических норм существенно зависит от корректности выбора модели многолетнего тренда. Особенно это относится к получаемому

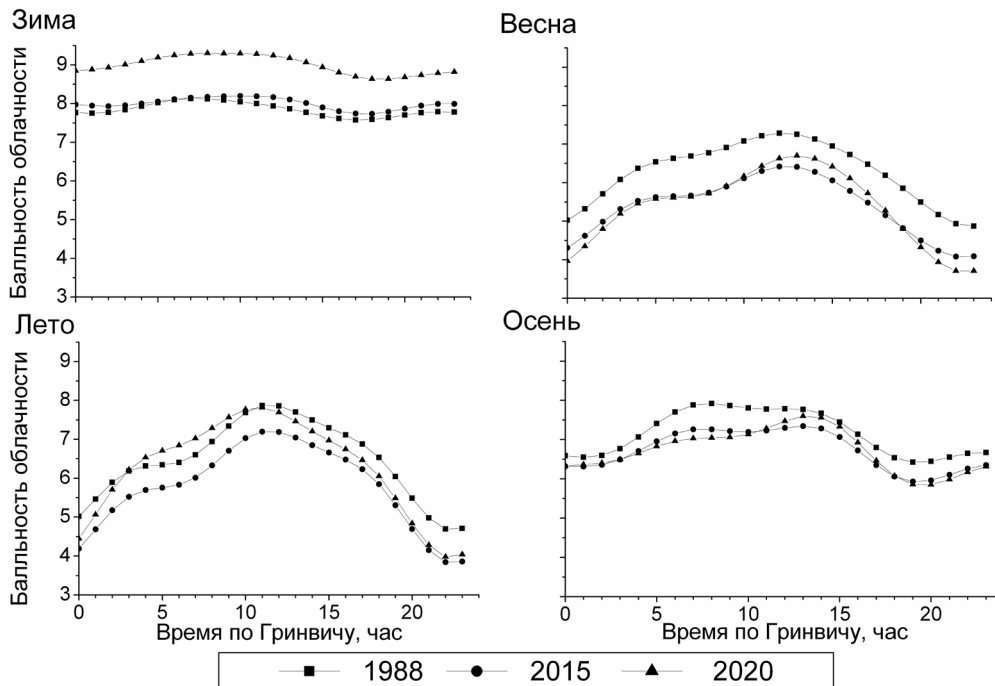


Рис. 7. Суточный ход облачности в зависимости от сезона в разные годы

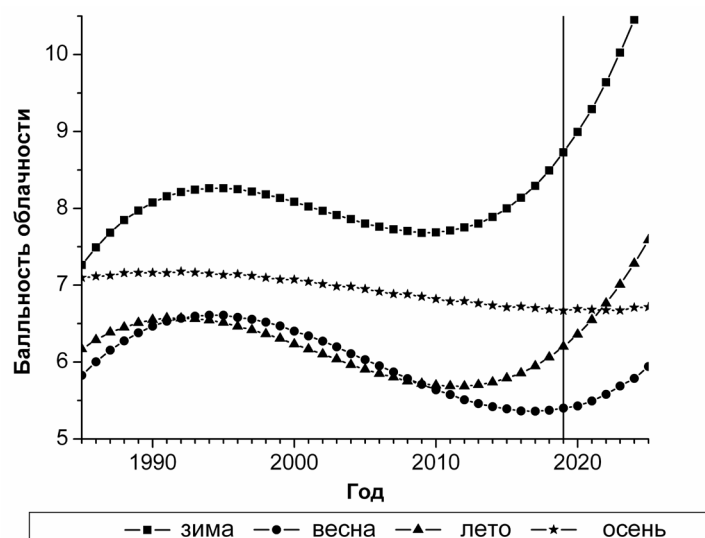


Рис. 8. Многолетние тренды среднесуточной балльности облачности. Вертикальная линия отделяет область прогноза

экстраполяцией прогнозу будущего поведения метеопараметров. Поэтому важно обсудить причины не очень удачного такого выбора в [1, 8, 9], чтобы избежать подобных ошибок в будущем.

Следует заметить, что авторы концепции динамической климатической нормы в своих исследованиях никогда не выходили за рамки модели линейного тренда. Авторами [1] впервые применена более сложная квадратичная модель, хотя уже тогда можно было обнаружить основания для ее дальнейшего усложнения.

Возможно, на это также повлияли статистические оценки качества уравнения регрессии с использованием критерия Фишера [10], базирующегося на сравнении объясненной уравнением регрессии дисперсии и дисперсии данных наблюдений. Огромное число наблюдений, участвовавших в расчетах, способствовало уверенному выводу о статистической значимости использованного варианта уравнения, а проверка рациональности добавления кубических членов в модель тренда с последующей оценкой их значимости не была проведена по названной выше причине.

Между тем, эти действия позволили бы обнаружить эффективность применения более гибкой модели тренда уже тогда (рис. 9). В частности, прекратившееся снижение зимних температур и начавшееся после 2010 г. их увеличение качественно верно описываются в рамках кубической модели тренда даже с использованием ограниченного 2015-м годом набора данных наблюдений. Следует заметить, что на этом рисунке (в отличие от рис. 3) приведены рассчитанные многолетние тренды температуры для середины каждого из сезонов, а не их среднесезонные значения.

Кстати, авторы [1] отметили присутствие повторяющихся с некоторой цикличностью отклонений измеренных среднемесячных значений температуры воздуха от рассчитанных на основании полученной климатической нормы (рис. 1 в [1]). Однако этому не было уделено должного внимания, и несовершенство квадратичной модели тренда осталось незамеченным. Цикличность легко обнаружить, если сгладить отклонения среднемесячных наблюдений от рассчитанной климатической нормы (рис. 10). Как видно, отклонения возникают с периодичностью, близкой к шести годам, а возможно, и к трем. Правда, попытка учета этого обстоятельства предполагает включение в модель тренда циклической составляющей (отличной от полиномиальной) с меняющейся, судя по рис. 10, периодичностью. Это сложная задача, поскольку уравнение регрессии становится явно нелинейным. Здесь очень полезной может оказаться информация о возможных геофизических причинах такой цикличности, что позволило бы судить об обоснованности дальнейшей модификации модели тренда.

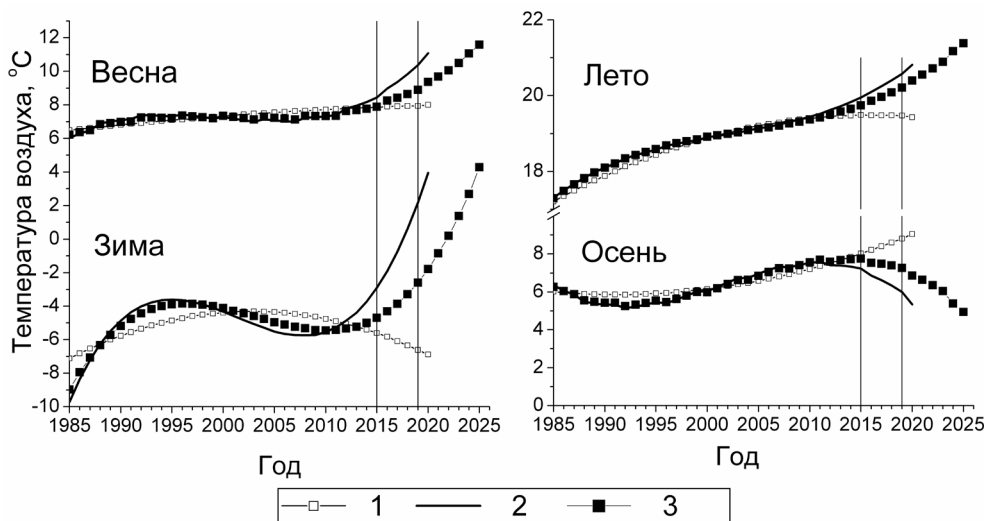


Рис. 9. Многолетние тренды температуры воздуха с использованием данных наблюдений за периоды 1985–2015 и 1985–2019 гг. Вертикальные линии отделяют области прогноза для первого и второго периодов. 1 – квадратичная модель тренда, первый период (согласно [1]), 2 – кубический тренд и первый период, 3 – кубический тренд и второй период

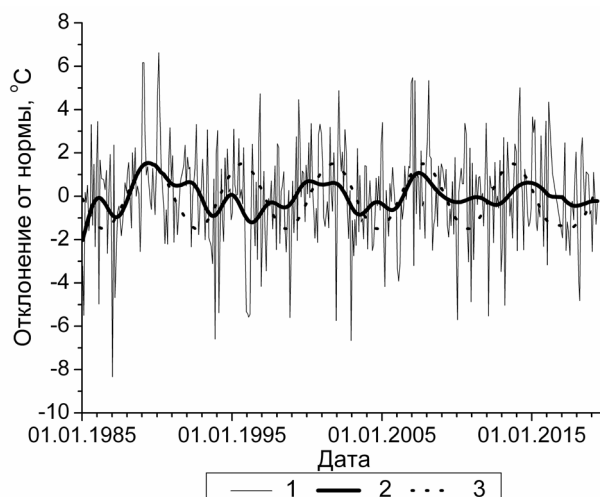


Рис. 10. Отклонение среднемесячных значений температуры воздуха от среднемесячной нормы (1). 2 – результат сглаживания отклонений, 3 – синусоидальная функция с периодом 6 лет

Самые существенные отличия проведенного расчета от выполненного в [1] относятся к прогнозу будущего поведения метеопараметров. Сравнение прошлого прогноза с результатами расчета с использованием модели кубического тренда за более длительный период наблюдений, почти охватывающий область предыдущего пятилетнего прогноза, демонстрирует недостатки модели квадратичного тренда.

Статистическая значимость отдельных коэффициентов регрессии может оказаться полезной при анализе необходимости их присутствия для корректного описания результатов уже полученных наблюдений, но она имеет мало практической ценности в области прогноза. Более полезной и существенной здесь является дополнительная информация (не связанная со статистикой) о процессах, «управляющих» атмосферой, и их характерных временах действия.

В частности, допущенных ошибок прогноза в [1] можно было бы избежать при более тщательном анализе исходных данных. В качестве примера можно сослаться на [11], где были представлены вполне обоснованные соображения о нецелесообразности усложнения модели тренда стратосферного озона посредством перехода к ее кубической версии.

Судить о прогностических возможностях использованного подхода можно посредством сравнения ранее полученного прогноза с результатами последующих наблюдений или их обработки. Это и было сделано в настоящей публикации. Выполненное сравнение показывает, что при удачном выборе модели многолетнего тренда прогноз на несколько лет вперед оказывается качественно верным.

Заключение. В данной публикации описаны результаты применения концепции динамичной климатической нормы для анализа поведения некоторых метеорологических параметров в г. Минске в течение периода 1985–2019 гг. и прогноза их дальнейшего поведения в ближайшие годы. Использована модель кубического тренда. Прогноз будущего поведения многолетних трендов метеопараметров в ряде случаев качественно отличается от полученного ранее с использованием квадратичной модели тренда.

Обсуждены вопросы выбора модели многолетнего тренда метеопараметров с целью получения более достоверного прогноза. Помимо статистических критериев, здесь может оказаться полезной дополнительная информация из альтернативных источников о тенденциях и причинах изменения изучаемых метеопараметров. Возможно, более перспективным окажется использование моделей многолетнего тренда, отличных от полиномиальной.

Список использованных источников

1. *Людчик, А. М.* Динамичные климатические нормы и многолетние тренды метеопараметров для г. Минска / А. М. Людчик, В. И. Покаташкин, Е. В. Комаровская // Природные ресурсы. – 2016. – № 1. – С. 64–71.
2. Analysis of seasonal cycles in climatic trends with application to satellite observations of sea ice extent / K. Y. Vinnikov [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 2002. – Vol. 29, no. 9. doi: 10.1029/2001GL014481
3. Diurnal and seasonal cycles of trends of surface air temperature / K. Y. Vinnikov [et al.] // J. Geophys. Res. – 2002. – Vol. 107, no D22. – P. 4641. doi:10.1029/2001JD002007
4. Analysis of diurnal and seasonal cycles and trends in climatic records with arbitrary observation times / K. Y. Vinnikov [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 2004. – Vol. 31. L06205. doi:10.1029/2003GL019196
5. Temperature trends at the surface and in the troposphere / K. Y. Vinnikov [et al.] // J. Geophys. Res. – 2006. – Vol. 111. D03106. doi:10.1029/2005JD006392
6. *Людчик, А. М.* Многолетний тренд приземного озона / А. М. Людчик, В. И. Покаташкин // Природные ресурсы. – 2014. – № 1. – С. 97–105.
7. Климатическая норма приземного озона в чистой атмосфере Беларуси / В. В. Божкова [и др.] // Природные ресурсы. – 2019. – № 2. – С. 98–107.
8. *Людчик, А. М.* Региональные особенности климата Беларуси и их изменение в последние десятилетия. I. Температура и скорость ветра / А. М. Людчик, В. И. Покаташкин, В. Я. Венчиков // Природные ресурсы. – 2017. – № 1. – С. 75–82.
9. *Людчик, А. М.* Региональные особенности климата Беларуси и их изменение в последние десятилетия. II. Влажность воздуха и облачность / А. М. Людчик, С. Д. Умрейко // Природные ресурсы. – 2017. – № 2. – С. 83–89.
10. *Бородич, С. А.* Вводный курс эконометрики: учеб. пособие / С. А. Бородич. – Минск: БГУ, 2000. – 354 с.
11. *Божкова, В. В.* Трансформация озонового слоя в средних широтах Северного полушария / В. В. Божкова, А. М. Людчик, С. Д. Умрейко // Природные ресурсы. – 2018. – № 2. – С. 102–111.

Поступила 21.07.2020