

КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ**CLIMATIC RESOURCES****КЛІМАТЫЧНЫЯ РЭСУРСЫ**

ISSN 1810-9810 (Print)

УДК 551.510.534

А. Н. Акимов¹, С. И. Гуляева², А. М. Людчик¹, П. Н. Павленко³¹*Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ,
Минск, Беларусь, e-mail: liudchikam@tut.by*²*Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем
им. А. Н. Севченко, Минск, Беларусь, e-mail: ms.bruchkovskaya@yandex.ru*³*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,
e-mail: pavlenko_pn@mail.ru***О ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ ОЗОнового СЛОЯ**

Аннотация. Анализируется качество сделанного ранее прогноза состояния озонового слоя над различными регионами Северного полушария с учетом наблюдений в последние годы. Прогноз был получен с использованием концепции динамической климатической нормы и модели квадратичного многолетнего тренда общего содержания озона по данным спутниковых наблюдений за 1978–2017 гг. Прогнозные значения многолетнего тренда общего содержания озона (ОСО) сравниваются с результатами расчета тренда по данным за период, включающий и область прогноза. При этом была использована усовершенствованная модель тренда в виде полинома третьей степени, более соответствующая ожидаемому поведению стратосферного озона. Многолетние тренды в рамках обеих моделей почти совпадают в пределах ранее использованного периода, однако прогноз на 2018–2022 гг. не во всех случаях оправдался. Анализируются причины несоответствия и возможные пути его совершенствования.

Ключевые слова: стратосферный озон, общее содержание озона, динамическая климатическая норма, многолетний тренд стратосферного озона

A. N. Akimov¹, S. I. Gulyaeva², A. M. Liudchik¹, P. N. Paulenka³¹*National Ozone Monitoring Research Centre of the Belarusian State University,
Minsk, Belarus, e-mail: liudchikam@tut.by*²*Applied Physical Problems Research Institute named after A. N. Sevchenko,
Minsk, Belarus, e-mail: ms.bruchkovskaya@yandex.ru*³*Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, e-mail: pavlenko_pn@mail.ru***ON THE POSSIBILITIES OF FORECASTING THE STATE OF THE OZONE LAYER**

Abstract. The quality of the forecast of the state of the ozone layer over various regions of the Northern Hemisphere is analyzed, taking into account observations in recent years. The forecast was obtained using the concept of a dynamic climate norm and a model of a quadratic long-term trend of the total ozone content based on satellite observations for the period 1978–2017. The predicted values of the long-term trend of the total ozone content (TOC) are compared with the results of calculating the trend based on the data for the period that includes the forecast area. An improved third-degree polynomial trend model was used to better match the expected behavior of stratospheric ozone. Long-term trends in both models practically coincide within the previously used period, however, the forecast for the period 2018–2022 not justified in all cases. The reasons for the discrepancy and possible ways to improve the forecast are analyzed.

Keywords: stratospheric ozone, total ozone, dynamic climate normal, long-term trend of stratospheric ozone

A. M. Akimov¹, S. I. Gulyaeva², A. M. Liudchik¹, P. M. Pavlenka³¹*Нацыянальны навукова-даследчы цэнтр маніторынгу азонасферы БДУ,
Мінск, Беларусь, e-mail: liudchikam@tut.by*²*Навукова-даследчы інстытут прыкладных фізічных праблем імя А. Н. Севчанкі, Мінск, Беларусь,
e-mail: ms.bruchkovskaya@yandex.ru*³*Беларускі нацыянальны тэхнічны ўніверсітэт, Мінск, Беларусь, e-mail: pavlenko_pn@mail.ru***АБ МАГЧЫМАСЦЯХ ПРАГНОЗУ СТАНУ АЗОНОВАГА ПЛАСТА**

Анатацыя. Аналізуецца якасць зробленага раней прагнозу стану азнавага пласта над рознымі рэгіёнамі Паўночнага паўшар'я з улікам назіранняў у апошнія гады. Прагноз быў атрыманы з выкарыстаннем канцэпцыі дынамічнай кліматычнай нормы і мадэлі квадратнага шматгадовага тренду агульнага зместу азону па дадзеным спадарожнікавых назіранняў за 1978–2017 гг. Прагнозные значэнні шматгадовага тренду агульнага зместу азону (АЗА) параўноўваюцца

з результатами розрізку тренду па дадзеных за перыяд, які ўключае і вобласць прагнозу. Пры гэтым была выкарыстана ўдасканаленая мадэль тренду ў выглядзе палінома трэцяй ступені, больш адпаведная чаканым паводзінам стратасфернага азону. Шматгадовыя тренды ў рамках абедзвюх мадэляў амаль супадаюць у межах раней выкарыстанага перыяду, аднак прагноз на перыяд 2018–2022 гг. не ва ўсіх выпадках апраўдаўся. Аналізуюцца прычыны неадпаведнасці і магчымыя шляхі яго ўдасканалення.

Ключавыя словы: стратасферны азон, агульная колькасць азону, дынамічная кліматычная норма, шматгадовы трэнд стратасфернага азону

Введение. В работах [1, 2] представлены результаты расчета динамической климатической нормы [3–6] общего содержания озона (ОСО) в атмосфере над различными регионами средних широт Северного полушария. Сразу следует указать на принципиальное отличие концепции динамической климатической нормы от ее традиционного определения, принятого Всемирной метеорологической организацией: нормой называется среднее значение климатического параметра, определенное в течение 30 лет непрерывных наблюдений [7]. Динамическая норма допускает свое изменение в пределах периода, использованного для ее определения. Таким образом, с учетом не равного нуля многолетнего тренда норма изменяется от года к году. Иными словами, это «живая» норма, меняющаяся со временем не только каждые следующие 30 лет, но и в течение конкретного тридцатилетия.

Изначально концепция динамической климатической нормы успешно применялась к метеорологическим параметрам с использованием простейшей модели линейного многолетнего тренда [3–6]. Для описания состояния озонового слоя земной атмосферы, подвергшегося существенному истощению в результате человеческой деятельности в конце XX в., была применена более гибкая модель квадратичного тренда [1, 2].

Мировым сообществом были приняты меры [8] по уменьшению дальнейшего антропогенного воздействия на озоносферу: сокращение производства и использования в промышленности и быту хлорфторуглеродов (фреонов), приводящих к разрушению озонового слоя. В последние годы ведутся интенсивные исследования [9] эффективности предпринятых усилий по восстановлению озонового слоя, поскольку озон поглощает опасное ультрафиолетовое солнечное излучение и препятствует его проникновению к поверхности Земли.

Обычно в рамках подобных исследований используются модели тренда, состоящие из двух линейных участков [9]. Квадратичная модель представляется нам более адекватной для описания поведения ОСО над планетой, прошедшего через минимум в течение последних 50 лет. В указанных выше работах [1, 2] помимо прочего анализируется также возможность описания поведения многолетнего тренда ОСО в рамках модели с большими степенями свободы (в виде полинома третьей степени) и приводятся аргументы, обосновывающие отказ от нее на данном этапе: «Это известный эффект необоснованного увеличения числа степеней свободы в уравнении регрессии, ведущего к тенденции решения детально описать случайные флуктуации исходных данных» [1].

К настоящему времени удлинились ряды спутниковых наблюдений за ОСО, стали доступны данные еще почти пяти лет наблюдений. Это дает возможность еще раз попробовать использование модели кубического тренда, поскольку с удлинением рядов данных принятая модель лишается способности реагировать на кратковременные флуктуации измеряемой величины. Дополнительным стимулом для этого является то, что кубическая модель тренда (в отличие от квадратичной) позволяет хотя бы приближенно отразить ожидаемые в XXI в. восстановление и стабилизацию озонового слоя в результате предпринятых мер, поскольку допускает еще один экстремум кроме минимума в конце прошлого века. Анализируется качество полученного ранее прогноза поведения стратосферного озона посредством сравнения с расчетами, использующими кубическую модель тренда и расширенный ряд данных наблюдений. Обсуждаются вопросы повышения достоверности прогноза посредством учета априорной информации.

Следует также отметить, что постановка задачи в [1, 2] и в настоящей публикации существенно отличается от «традиционной», когда исследователи интересуются влиянием на озоновый слой только сокращения концентрации антропогенных озоноразрушающих веществ в стратосфере, выделяя этот эффект из ряда других факторов [9]. Предлагаемые решения такой задачи не слишком убедительны, поскольку используют множество до сих пор слабо обоснованных предположений о влиянии ряда наблюдаемых эффектов в тропосфере и океанах на стратосферный озоновый слой. Авторы статьи не отрицают возможность такого взаимовлияния (а не однонаправленного влияния), однако физические механизмы до сих пор остаются неясными (на уровне гипотез) ввиду сложности проблемы.

В качестве правомочности используемого авторами подхода достаточно заметить, что основным мотивом принятия Монреальского протокола [8] по веществам, разрушающим озоновый слой, явилось стремление избежать риска увеличения интенсивности вредного для всего живого на Земле солнечного коротковолнового ультрафиолетового излучения [10], зависящего в первую очередь от

состояния озоносферы. В связи с этим возникают вопросы: как изменяется со временем озоновый слой планеты и какой можно сделать прогноз изменений в ближайшем будущем, не отвлекаясь на причины наблюдаемых изменений? Используемая концепция динамической климатической нормы может быть успешно применена и в рамках упомянутого традиционного подхода [9], фокусирующего внимание на причинах изменения состояния озоносферы.

Динамическая климатическая норма. Изменение со временем некоторой климатической переменной $y(t)$ представляется в следующем виде:

$$y(t) = Y(t) + y'(t), \quad (1)$$

где $Y(t)$ – климатическая норма, $y'(t)$ – кратковременные флуктуации (отклонения от нормы) [3–6].

Динамическая климатическая норма состоит из двух слагаемых:

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

где $A(t)$ – циклическая часть ($A(t) = A(t+T)$, T – период, равный длительности года), повторяющаяся из года в год, $Tr(t)$ – многолетний тренд.

В случае модели тренда линейного типа

$$Tr(t) = B(t)t, \quad (3)$$

где $B(t)$ – циклическая функция ($B(t) = B(t+T)$), описывающая сезонную изменчивость тренда.

Здесь и далее предполагается, что тренд может меняться в зависимости от поры года, сохраняя при этом линейный, квадратичный или другой характер. Просто коэффициенты меняются в зависимости от времени года. Для квадратичного тренда следует использовать выражение:

$$Tr(t) = B(t)t + C(t)t^2, \quad (4)$$

где $C(t) = C(t+T)$.

Аналогично в случае кубической модели тренда:

$$Tr(t) = B(t)t + C(t)t^2 + D(t)t^3, \quad (5)$$

где $D(t)$ – также циклическая функция.

Дополняя модель тренда соответствующими зависимостями, можно при желании смоделировать влияние на общее содержание озона таких эффектов, как динамические процессы в стратосфере, изменение солнечной активности и т. п., чтобы выделить изменения, обусловленные очищением стратосферы от озоноразрушающих веществ.

Неизвестные циклические функции $A(t)$, $B(t)$ и др. удобно моделировать конечными рядами Фурье, что также решает проблему неравномерности рядов данных и пропусков в них [5]. Параметры функций определяются посредством минимизации функционала:

$$F = \sum_t (Y(t) - y(t))^2 w(t), \quad (6)$$

где w – весовая функция, пропорциональная числу лет, в которые были получены наблюдения для календарного дня года, отвечающего времени t .

Исходные данные и детали расчета. Для расчетов, как и в [1, 2], использованы данные спутниковых измерений общего содержания озона приборами TOMS (1978–1993, 1996–2004) и OMI (2005–2017), дополненные наблюдениями прибором OMI [11] в 2018–2022 гг. (в 2022 г. использованы данные за январь – май). Расчеты проведены для регионов, находящихся в полосе 30–40° с. ш., 40–50° с. ш., 50–60° с. ш. и в интервалах 75–120° з. д. (Северная Америка), 15–60° з. д. (Атлантика), 5–50° в. д. (Европа), 70–115° в. д. (Азия) [1]. Данные за каждый день измерений в узлах спутниковой сетки, попадающих в границы выбранного региона, усреднялись и далее обрабатывались по единой методике.

Для определения климатической нормы общего содержания озона использованы следующие значения параметров: тренд – кубический, функции $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, $D(t)$ моделировались разложением по синусам и косинусам с периодами 1 год, $1/2$ и $1/3$ года плюс свободный член.

Результаты расчетов. В этом разделе в основном анализируется достоверность прогноза на период с 2018 по 2022 г., сделанного на основе квадратичной модели тренда [1, 2]. Анализ осуществляется посредством сравнения с расчетами, включающими данные наблюдений за ОСО за указанный период и использующими более гибкую кубическую модель многолетнего тренда ОСО.

Сразу может возникнуть вопрос: почему прогноз, полученный с использованием одной модели тренда, сравнивается с результатами обработки расширенного ряда данных в рамках другой модели? Кубическая модель лучше соответствует ожидаемому поведению озонового слоя: после очище-

ния стратосферы от антропогенных озоноразрушающих веществ следует ожидать восстановления и стабилизации ОСО на «дофреоновом» уровне, а не ухода в плюс или минус бесконечность, как предполагает параболическая модель тренда. Кубическая модель тоже не избавляет от бесконечности в будущем, однако позволяет увидеть точку стабилизации ОСО после прекращения действия выброшенных в атмосферу антропогенных разрушителей озона.

Следует отметить, что изменение модели многолетнего тренда обязательно отражается на циклической части климатической нормы, поскольку процедура их определения – минимизация функционала [6] – неразрывно связывает обе части динамической нормы. В качестве примера на рис. 1 приведены циклические части нормы в случае квадратичной и кубической моделей тренда для североамериканского региона в полосе 50–60° с. ш. и периода наблюдений 1978–2022 гг. По оси ординат расположены значения ОСО в единицах Добсона (1 ед. Добсона = 0,001 атм. см). Как видно из рис. 1, различия невелики, такими же они остаются и для других регионов и широтных полос.

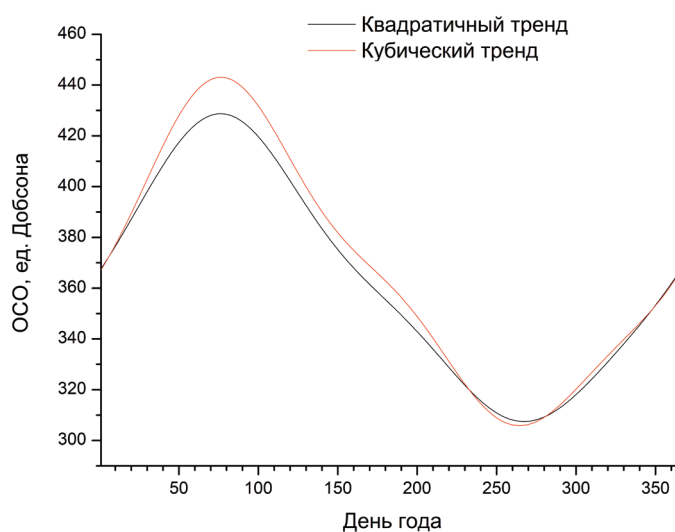


Рис. 1. Циклическая часть климатической нормы ОСО в случае квадратичной и кубической моделей многолетнего тренда по расчетам за 1978–2022 гг.

На рис. 2 приведены многолетние тренды среднегодовых значений ОСО для квадратичной [1] и кубической моделей тренда. Квадратичный тренд после 2017 г. содержит прогнозные значения. Прогнозные значения для кубического тренда начинаются после 2022 г.

В интервале 1987–2017 гг. обе модели показывают почти совпадающие значения. При этом совершенствование модели тренда за счет добавления новых переменных – учета кубических членов – оказывается статистически значимым (подробнее см. раздел «Обсуждение результатов»). Это подтверждает достоверность полученных ранее результатов о многолетнем тренде ОСО. Однако в данной публикации основное внимание уделяется достоверности представленного ранее [1, 2] прогноза поведения ОСО на следующие 5 лет после использованного для расчетов периода.

В полосе 30–40° с. ш. хорошее соответствие наблюдается также и в 2017–2022 гг. (это период прогноза для квадратичной модели). В более высоких широтах прогноз на основе модели квадратичного тренда заметно отличается от результатов расчетов, полученных с моделью кубического тренда и учетом дополнительных данных измерений за этот период. В частности, в интервале 40–50° с. ш. кубический тренд в Америке и Азии стабилизировался, в Атлантике он имел тенденцию к увеличению ОСО. В Европе заметно снижение, как и в случае кубического тренда, рассчитанного по данным сокращенного периода [1, 2]. В интервале 50–60° с. ш. в Америке тренд ОСО в этот период стабилен, в Атлантике и Европе – продолжался рост, как и предсказывала квадратичная модель, а в Азии заметно резкое снижение.

Более детальную информацию можно получить, анализируя сезонную изменчивость многолетних трендов ОСО (рис. 3). Возможность такой детализации является очевидным преимуществом концепции динамической климатической нормы, базирующейся на исходных ежедневных рядах данных, а не на результатах их годичного усреднения. Тренды для целых широтных поясов мало информативны, поэтому не рассчитывались. Они не представляют интереса, поскольку поведение озона над отдельными регионами пояса сильно различается. Только в интервале 40–50° с. ш. региональные

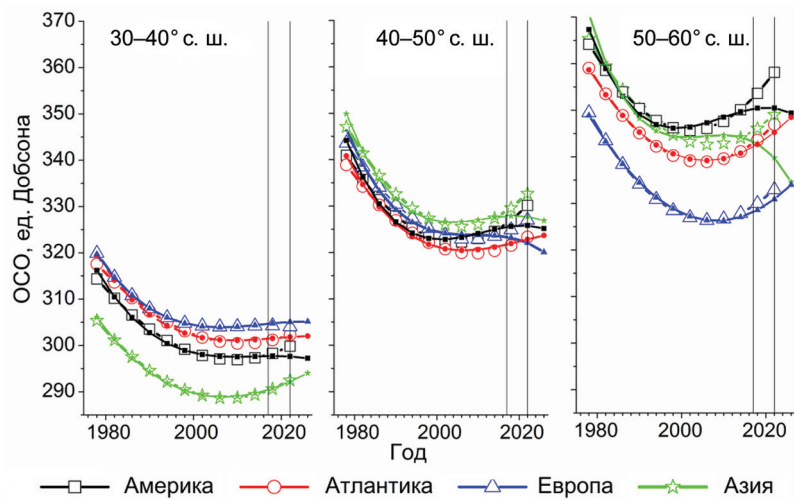


Рис. 2. Многолетние тренды среднегодовых значений ОСО в рамках квадратичной (на основании данных 1987–2017 гг. [1]) и кубической (на основании данных 1987–2022 гг.) моделей тренда. Вертикальные линии отмечают верхние границы указанных периодов. Кубическому тренду соответствуют кривые, продолжающиеся за 2022 г. и обозначенные малыми закрашенными метками

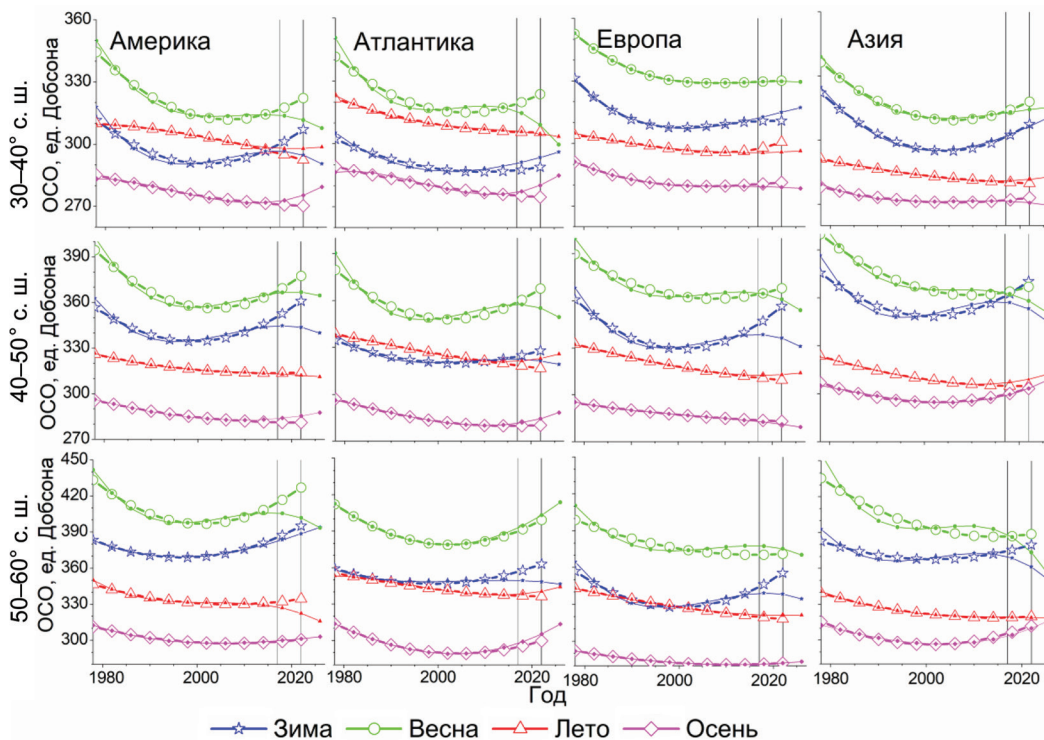


Рис. 3. Сезонные многолетние тренды ОСО над различными регионами. Результаты, полученные с кубической моделью тренда, представлены кривыми с малыми закрашенными символами в сравнении с расчетами с квадратичной моделью [1]. Вертикальными линиями, соответствующими 2017 и 2022 гг., обозначены верхние границы периодов, данные за которые использованы для расчетов

тренды среднегодовых значений ОСО почти совпадают (см. рис. 2). На более южных и более северных широтах различия между регионами весьма существенны. Единственным источником такого различия является неоднородность земной поверхности, влияющая на динамику не только тропосферы, но и стратосферы, в которой находится основная масса озонового слоя. Именно особенности динамики стратосферы, обусловленные указанной причиной, приводят к региональным различиям в поведении озона и, как оказалось, в последние годы маскируют в Северном полушарии эффект сокращения выбросов озоноразрушающих веществ [9].

В Америке в интервале 30–40° с. ш. зимой и весной рост ОСО прекратился и кривые кубического тренда указывают на начало его уменьшения. Прогноз на основе квадратичного тренда [1] показывал рост в эти сезоны. Летом тренд стабилизировался. Прогнозировавшееся уменьшение ОСО осенью не оправдалось: наблюдается рост. В интервале широт 40–50° с. ш. в зимний и весенний сезоны тренд ОСО в отличие от прогнозируемого роста стабилизировался. Летом и осенью его поведение почти совпадает с прогнозом. В самом северном регионе заметные отклонения от прогноза произошли весной и летом: вместо ожидавшегося увеличения ОСО тренд указывает на его снижение.

В Атлантике существенные отклонения от прогнозных значений в интервалах 30–40° с. ш. и 40–50° с. ш. заметны только весной, а в интервале 50–60° с. ш. – зимой (во всех упомянутых случаях прогнозируемое в рамках квадратичной модели увеличение ОСО не оправдалось и в действительности тренд показывает его уменьшение).

В низких широтах Европы прогноз на основе квадратичного тренда оказался вполне удовлетворительным. Однако в регионах, относящихся к более высоким широтам, заметны отличия от расчетов с использованием кубической модели и расширенного ряда данных. В частности, прогнозируемый рост ОСО в зимнее время не оправдался: кубическая модель показывает медленное снижение. В весеннее время прогнозировалось почти стабильное поведение ОСО, а расчеты показали его постепенное снижение. В то же время летний и осенний прогнозы полностью подтверждаются.

В самом южном регионе Азии прогнозы почти совпали с новым расчетом. Это же касается летнего и осеннего многолетних трендов и в двух других азиатских регионах. Ошибочность прогноза проявилась в этих регионах только в зимний и весенний периоды: ожидавшийся рост ОСО в действительности, согласно модели кубического тренда и данных наблюдений за обсуждаемый период, показывает его снижение.

Таким образом, можно сделать вывод, что наметившаяся в последние годы тенденция снижения среднегодовых значений ОСО в атлантическом регионе (40–50° с. ш.) в основном обусловлена понижением ОСО в весенние месяцы, а быстрое уменьшение среднегодовых значений ОСО в азиатском регионе (50–60° с. ш.) – понижением ОСО в зимние и весенние сезоны. Очевидно, что это совершенно не связано с продолжающимся очищением стратосферы от озоноразрушающих веществ способствующим восстановлению озонового слоя, поэтому следует искать другие причины, как делается, например, в [9]. Мы только выявили сезоны в отдельных регионах, представляющих наибольший интерес для поиска таких причин.

Результаты и их обсуждение. Многолетние тренды среднегодовых значений ОСО, а также сезонные тренды, полученные с новой моделью, хорошо согласуются с результатами расчетов по квадратичной модели тренда в 1978–2017 гг. [1, 2]. При этом изменение модели тренда с квадратичной на кубическую (за счет добавления в модель дополнительных степеней свободы) привело к статистически значимому улучшению модели. Обычно оценку статистической значимости используют для обоснования предпочтения в выборе конкретной модели описания ряда наблюдений [12]. В связи с этим следует сделать несколько замечаний.

В нашем случае, когда речь идет о рядах данных ежедневных измерений ОСО за более чем 40 лет, суммарное число данных очень велико, поэтому даже при очень малом относительном уменьшении объясненной дисперсии в случае использования новой модели с увеличенным числом степеней свободы оценка эффекта по критерию Фишера оказывается статистически значимой для самых высоких уровней значимости.

В качестве подтверждения сказанного сравним два расчета для случая Северной Америки (интервал 120–75° з. д., 50–60° с. ш.) за весь период измерений. Полное число измерений – 14 417. В случае квадратичной модели тренда число степеней свободы – 21, кубической – 28. Значение параметра Фишера для проверки гипотезы о значимости добавленных в модель степеней свободы – 14,53. В то же время критическое значение для добавленных семи степеней свободы ($28 - 21 = 7$; $14\,417 - 28 - 1 = 14\,389$) при уровне значимости 0,001 не превышает 12. Иными словами, добавленные переменные являются статистически значимыми, хотя при переходе к более гибкой модели тренда остаточная дисперсия уменьшается с 607,28 всего лишь до 603,3, то есть менее чем на 1 %.

Второе замечание касается достоверности экстраполяции полученной модели за пределы периода, на основании которого модель построена, – достоверности прогноза будущего развития событий. Понятно, что функция, описывающая поведение изучаемой переменной во времени, должна быть непрерывной и достаточно гладкой, чтобы был смысл продолжать (экстраполировать) ее в будущее, за пределы области определения. Однако характеристики обсуждаемой функции находятся посредством минимизации ее отклонения от измеренных данных, безотносительно ее поведения за пределами области данных. Статистические оценки качества моделирования также не распро-

страняются за пределы этой области. Единственный способ оценки качества прогноза – сравнение с результатами последующих наблюдений. Именно так авторы статьи и поступили.

Между тем существуют способы повышения достоверности прогноза за счет использования дополнительной информации об изучаемом явлении, о чем уже говорилось [1, 2]. Это весьма общий подход, когда «голая» математика может быть существенно улучшена после привлечения априорных знаний о физических и химических особенностях процесса, особенностях даже самого общего характера. В качестве примера можно назвать метод регуляризации Тихонова для решения некорректных задач, использующий предположение о гладкости ожидаемого решения [13]. Дополнительные сведения о неотрицательности исходного спектра и минимальной полуширине его структурных деталей позволяют еще более улучшить качество относящейся к типу некорректных задач редукции к идеальному прибору при обработке спектров, зарегистрированных несовершенным прибором [14].

В задаче моделирования многолетнего тренда ОСО такой дополнительной информацией может служить требование ограниченности многолетнего тренда: ОСО не может опускаться до нуля и не может существенно превышать значения «дофреоновского периода», зависящие в основном только от почти не меняющихся интенсивности солнечного излучения и количества молекулярного кислорода в атмосфере. С этой точки зрения полиномиальная аппроксимация тренда не является оптимальной и должна быть заменена на более адекватную, поскольку прогнозные значения в рамках использованной модели рано или поздно стремятся к плюс или минус бесконечности. Это явно противоречит предполагаемому развитию событий. Варианты, в большей степени опирающиеся на знания о физических и химических процессах в озоновом слое, способны обеспечить более высокую достоверность прогноза его поведения в ближайшие годы.

Заключение. Прогноз поведения озонового слоя [1, 2] в ряде случаев оправдался, в ряде – нет. Прогноз, определенный в данной публикации на основании более гибкой модели кубического многолетнего тренда ОСО, вероятно, тоже не будет точным даже в ближайшие годы. Одной из основных причин является не слишком подходящая для данного случая полиномиальная аппроксимация тренда ОСО, использованная в расчетах. Повысить достоверность прогноза можно посредством учета дополнительной информации о характере процессов в озоновом слое планеты с целью введения обоснованных ограничений на модель многолетнего тренда ОСО.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. Bozhkova, V. Long-term trends of total ozone content over mid-latitudes of the Northern Hemisphere / V. Bozhkova, A. Liudchik and S. Umreiko // Int. J. of Remote Sens. – 2019. – Vol. 450, № 13. – P. 5216–5229.
3. 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, iss. 9. – P. 24-1–24-4.
4. Vinnikov, K. Y. Diurnal and seasonal cycles of trends of surface air temperature / K. Y. Vinnikov, A. Robock, A. Basist // J. Geophys. Res.: Atmos. – 2002. – Vol. 107, iss. D22. – P. 4641–4661.
5. 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, iss. 6. – 5 p.
6. Temperature trends at the surface and in the troposphere / K. Y. Vinnikov [et al.] // J. Geophys. Res.: Atmos. – 2006. – Vol. 111, iss. D3 – 14 p.
7. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. – 2017. – WMO-No. 1203, 29 p.
8. Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer [Electronic resource]: UNEP report of the Technology and Economic Assessment Panel / United Nations Environment Programme. – March, 2016. – Mode of access: <http://ozone.unep.org/en/assessment-panels/technology-and-economic-assessment-panel>. – Date of access: 24.11.2022.
9. Global total ozone recovery trends attributed to ozone-depleting substance (ODS) changes derived from five merged ozone datasets / M. Weber [et al.] // Atmos. Chem. Phys. – 2022. – Vol. 22. – P. 6843–6859.
10. Environmental effects of stratospheric ozone depletion, UV radiation and interactions with climate change: UNEP Environmental Effects Assessment Panel, update 2019 / G. H. Bernhard [et al.] // Photochem. Photobiol. Sci. – 2020. – Vol. 19. – P. 542–584.
11. NASA Ozone Watch [Electronic resource]. – Mode of access: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/data>. – Date of access: 14.06.2022.
12. Бережная, Е. В. Математические методы моделирования экономических систем / Е. В. Бережная, В. И. Березной. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 432 с.
13. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Изд-во МГУ, 1977. – 383 с.
14. Людчик, А. М. Использование априорной информации о спектре в задачах редукции к идеальному прибору / А. М. Людчик // Журн. прикладной спектроскопии – 1986. – Т. 44, № 5. – С. 802–806.

Поступила 28.11.2022