

РЕГИОНАЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ СТРАТОСФЕРНЫХ
ПРОЦЕССОВ В ФОРМИРОВАНИИ ПОГОДЫ И КЛИМАТА
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГАТ. В. ШЛЕНДЕР¹⁾, В. В. ЖУЧКЕВИЧ¹⁾, А. Н. КРАСОВСКИЙ^{1), 2)}¹⁾Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы

Белорусского государственного университета, ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Рассматриваются последние тенденции изменения стратосферных процессов, в частности дифференциация общего содержания озона, над территорией Республики Беларусь и их связь с приземной циркуляцией атмосферы. В результате статистического анализа подтверждена обнаруженная ранее отрицательная корреляционная связь общего содержания озона и приземной температуры, которая позволяет корректировать среднесрочный прогноз погоды. Установлен факт нарушения данной корреляции во время весенне-летних озоновых аномалий. Теоретически обоснована и практически проиллюстрирована гипотеза воздействия озонового механизма на тропосферные циркуляционные процессы (случай июльского урагана 2016 г. над территорией Беларуси). Представленный пример урагана показал частичное влияние стратосферы на тропосферу, продемонстрировав влияние струйных течений и больших градиентов в поле общего содержания озона на высоту тропопаузы. Сделан вывод о том, что летние резкие перепады общего содержания озона могут приводить к сильным перепадам уровня тропопаузы, появлению мощных струйных течений в зонах разрыва и, как следствие, ухудшению погодных условий в нижней тропосфере.

Ключевые слова: атмосферная циркуляция; стратосферный озон; прогноз погоды; высота тропопаузы; струйные течения; стратосферно-тропосферные процессы; озоновый механизм.

Образец цитирования:

Шлендер ТВ, Жучкевич ВВ, Красовский АН. Региональное влияние стратосферных процессов в формировании погоды и климата Республики Беларусь по данным мониторинга. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2018;2:25–38.

For citation:

Shlender TV, Zhuchkevich VV, Krasouski AN. Regional influence of stratospheric processes in the formation of weather and climate of the Republic of Belarus employing monitoring data. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2018;2:25–38. Russian.

Авторы:

Тимофей Викторович Шлендер – младший научный сотрудник лаборатории биофотоники.

Вероника Вадимовна Жучкевич – старший научный сотрудник лаборатории биофотоники.

Александр Николаевич Красовский – кандидат физико-математических наук; доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии географического факультета²⁾, ведущий научный сотрудник лаборатории оптических средств измерений¹⁾.

Authors:

Timofey V. Shlender, junior researcher at the laboratory of biophotonics.

timajaya@mail.ru

Veronika V. Zhuchkevich, senior researcher at the laboratory of biophotonics.

ronya@tut.by

Aliaksandr N. Krasouski, PhD (physics and mathematics); associate professor at the department of earth science and hydro-meteorology, faculty of geography^b, leading researcher at the laboratory of optical measuring instruments^a.

krasovsky@bsu.by

REGIONAL INFLUENCE OF STRATOSPHERIC PROCESSES IN THE FORMATION OF WEATHER AND CLIMATE OF THE REPUBLIC OF BELARUS EMPLOYING MONITORING DATA

T. V. SHLENDER^a, V. V. ZHUCHKEVICH^a, A. N. KRASOUSKI^{a, b}

^a*National Ozone Monitoring Research and Education Center, Belarusian State University,
7 Kurčatava Street, Minsk 220045, Belarus*

^b*Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*

Corresponding author: T. V. Shlender (timajaya@mail.ru)

The article aims at examining the latest trends in stratospheric processes, in particular, the differentiation of total ozone over the territory of the Republic of Belarus and their relationship with surface atmospheric circulation. As a result of the statistical analysis, the negative correlation link of total ozone and surface temperature, enabling to correct a medium-term weather forecast, is confirmed. Furthermore, the fact of violation of the correlation between total ozone and the surface temperature during the spring-summer ozone anomalies is revealed. The hypothesis of the influence of ozone mechanism on tropospheric circulation processes based on the specific case of the July hurricane of 2016 occurred over the territory of Belarus, is theoretically substantiated and practically illustrated. The hurricane has exemplified the partial effect of the stratosphere on the troposphere, demonstrating the influence of jet streams and large gradients in the field of total ozone on a height of the tropopause. Thus, one has been positive to conclude that summer sharp changes in total ozone can lead to strong tropopause variations along with the appearance of powerful jet streams in the gap zones resulted in deterioration of the weather conditions in the lower troposphere.

Key words: atmospheric circulation; stratospheric ozone; weather forecast; tropopause height; jet streams; stratospheric-tropospheric processes; ozone mechanism.

Введение

Изменение климата – одна из основных тем в специализированной литературе и средствах массовой информации. Причиной этого являются как глобальный характер проблемы, так и сохраняющиеся неопределенности предсказаний в среднесрочной и долгосрочной перспективе. Прогнозирование возможных изменений климата требует знания вариаций внешних и антропогенных климатообразующих факторов, понимания механизмов, определяющих ответ климатической системы Земли на эти воздействия.

До недавних пор обсуждение изменений климата и их прогнозирование ограничивались нижним слоем атмосферы – тропосферой. Исследования последних десятилетий показали, что слои верхней атмосферы (стратосфера, мезосфера) являются существенными звеньями общей циркуляции атмосферы, изменения термодинамических параметров которых оказывают воздействие на характер тропосферной циркуляции. Найдены многочисленные свидетельства того, что возмущения в верхней атмосфере могут распространяться вниз и состояние средней и верхней атмосферы имеет влияние на тропосферу [1; 2]. Механизмы этих связей проработаны не полностью, недостаточно количественных характеристик, однако взаимосвязь средней и нижней атмосферы совершенно очевидна.

Один из возможных механизмов передачи изменений, происходящих в верхней атмосфере (стратосфере, мезосфере), на приземный слой атмосферы – озоновый механизм [3]. Атмосферный озон, концентрация которого на различных высотах измеряется миллионными и миллиардными долями, является одним из важнейших атмосферных газов в силу своих оптических свойств. В стратосфере на высотах от 10 до 50 км находится около 90 % озона (~300–10 мбар). Это основной газ, участвующий в радиационном нагреве стратосферы и определяющий ее термическую структуру (увеличение температуры в диапазоне высот 9–50 км) и, следовательно, циркуляционный режим. Ультрафиолетовое излучение (УФ-излучение), которое составляет 3 % всего излучения, падающего на Землю, поглощается в основном стратосферным озоном. Такое циклическое преобразование озона формирует выделение тепловой энергии, которая идет на повышение температуры стратосферы.

Общее содержание озона (ОСО) в верхней стратосфере определяется совокупностью фотохимических и химических процессов, ниже – динамическими процессами, протекающими в верхней тропосфере и стратосфере. А. Х. Хргиан еще в начале 1970-х гг. обращал внимание на то, что «вызываемое озоном нагревание очень значительно и в большой степени определяет температурное поле стратосферы... Возможно, озон является главным фактором циркуляции атмосферы...» [4].

Содержание озона в атмосфере над каким-либо регионом характеризуется его количеством в вертикальном столбе с основанием 1 см^2 . В качестве единицы ОСО в атмосфере принята единица Добсона (еД, или DU). Одна единица Добсона равна слою озона 10 мкм при стандартных давлении и температуре. Это соответствует $2,69 \cdot 10^{16}$ молекул озона на 1 см^2 поверхности Земли.

В настоящее время проблема озонового слоя Земли является одной из наиболее значимых глобальных проблем сохранения природной среды. Существенные изменения содержания озона в атмосфере Антарктики (Антарктическая озоновая дыра), происходящие весной в течение многих лет, привели к заметным нарушениям климата на континенте, течений в океане, повлияли на количество осадков в Австралии. Влияние озона на климат – это сложный механизм, обусловленный различными процессами с обратными связями, определяющими теплообмен в атмосфере и зависящими от внешних и внутренних геофизических факторов. В настоящее время Всемирная метеорологическая организация рассматривает ОСО как один из важнейших климатических факторов [5; 6].

Более 40 лет назад уже высказывались идеи о роли вихрей верхнего уровня в циклогенезе нижней тропосферы [7]. Достаточно много исследований посвящено связи ОСО с высотой уровня тропопаузы [8; 9]. Максимум ОСО прогнозирует местоположение основной аномалии потенциальной завихренности (PVU) до зарождения циклона и во время его развития. Данные ОСО могут быть полезным индикатором структуры мезомасштабной (горизонтальный масштаб в приблизительном интервале $10\text{--}1000 \text{ км}$) тропопаузы, особенно в регионах, слабо охваченных тропосферными термодинамическими процессами [10]. Дж. Р. Холтон [11] определял уровень тропопаузы как изэнтропическую поверхность, или поверхность потенциальной завихренности. Р. Д. Гадсон представил четкие доказательства того, что общее поле озона в Северном полушарии может быть разделено на отдельные зоны, границы которых связаны с фронтами субтропической и полярной верхней тропосферы, а зимой – с положением стратосферного полярного вихря [12].

Связь величины ОСО с ложбинами и гребнями барических образований отмечалась с первых лет исследований. В Главной геофизической обсерватории (ГГО) имени А. И. Воейкова выполнялось сопоставление синоптических карт АТ300, АТ200 с данными ОСО [13]. Наибольшие значения ОСО характерны для арктических воздушных масс, наименьшие – для тропических, промежуточные – для умеренных. Границы областей с высокими и низкими уровнями ОСО всегда совпадают с полярными и субтропическими высотными фронтальными зонами, разделяющими указанные воздушные массы.

Большая часть исследований связи ОСО с погодой и климатом проведена с использованием данных, осредненных за большой период времени и осредненных зонально. Существующие численные прогностические модели учитывают температуру стратосферы, но не рассматривают влияние перемещающихся тропосферных воздушных масс на озоновый слой, который определяет изменения температурного режима нижней стратосферы.

В Национальном научно-исследовательском центре мониторинга озоносферы Белорусского государственного университета (НИИЦ МО БГУ) и ГГО имени А. И. Воейкова на протяжении ряда лет исследуются стратосферно-тропосферные взаимодействия. При этом проводится тщательный анализ одной из сторон этого взаимодействия – влияния распределения стратосферного озона на характеристики тропосферной циркуляции и связанные с ними погодные и климатические условия. Особое внимание уделено стационарным атмосферным фронтам, струйным течениям, положению уровня тропопаузы и внутритропической зоны конвергенции.

Изучение многолетних рядов наблюдений за ОСО показало, что летом изменения ОСО происходят синхронно с изменением температуры у земной поверхности, а зимой эта связь нарушается и снова восстанавливается весной. На основании полученных закономерностей в БГУ разработана методика краткосрочного (до 3 дней) прогноза уровней и доз облученности биологически активным УФ-излучением (УФ-индекс), базирующаяся на прогнозе ОСО и облачности в вегетационный период (конец марта – середина сентября) [14].

Из анализа данных орбитальных наблюдений за перемещением озоновых аномалий совместно с данными численного моделирования в системах WRF (Weather Research Forecast) и IFS (Integrated Forecast System) следует, что существует корреляция специфических изменений погодных условий с маршрутом движения озоновых аномалий [15; 16].

Полученные результаты позволили сформулировать некоторые предположения о причинно-следственных связях между динамикой стратосферного озона и тропосферной циркуляцией, а также о конкретных деталях механизма реализации этих связей [3]. Поле ОСО формируется за счет конкуренции двух механизмов, один из которых, условно названный радиационным, отвечает за образование этого вещества в верхней стратосфере и понижает высоту тропопаузы, другой, традиционный, условно названный термодинамическим, действует в тропосфере, создает условия для сухой и влажной неустойчивости и за счет этого поднимает высоту тропопаузы, в результате чего ОСО уменьшается. Взаимное влияние данных механизмов зависит от региона и времени года.

Концепция взаимодействия ОСО и циркуляции тропосферы, основанная на сопоставлении состояния глобальной циркуляции в тропосфере и состояния полей ОСО в стратосфере, включает в себя следующие ключевые моменты механизма, влияющего непосредственно на погоду и климат в заданном регионе:

- совокупность стратосферных процессов определяет пространственное распределение ОСО в стратосфере, которое, в свою очередь, формирует высоту тропопаузы над ячейками глобальной циркуляции;
- изменение положения тропопаузы изменяет скорости циркуляционных процессов в тропосфере и таким образом влияет на положение стационарных фронтов;
- стационарные фронты, которые являются границами между глобальными ячейками циркуляции, определяют траектории движения барических образований в тропосфере.

Рельеф тропопаузы напрямую отражает общую картину циркуляции атмосферы и распределение полей ОСО. Где последнего больше, там тропопауза ниже, где меньше – выше. В итоге уровень тропопаузы определяется конкуренцией как нижележащих, так и вышележащих атмосферных процессов.

Таким образом, влияние озона на погоду и климат в заданном регионе осуществляется не через некоторое прямое воздействие на атмосферные потоки, а в первую очередь путем изменения положения стационарных фронтов (рис. 1) и, соответственно, характеристик самих глобальных циркуляционных ячеек (например, смещение уровня тропопаузы воздействует на всю ячейку циркуляции).

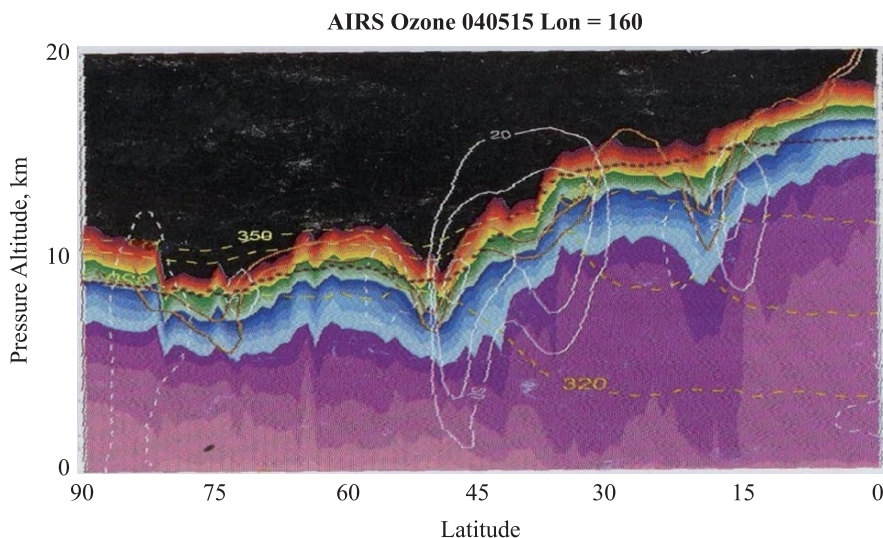


Рис. 1. Вертикальный разрез ОСО (едД) по 160-й долготе (желтый пунктир), области струйных течений, стационарных фронтов, скоростей ветра (м/с) (сплошные белые линии) и высота тропопаузы (темный пунктир).

Источник: [17]

Fig. 1. Vertical profile of TO (DU) at the longitude of 160° (indicated in units D and marked by a yellow dotted line), areas of jet streams, stationary fronts, wind speeds (marked by solid white lines and indicated in m/s) and height of the tropopause (marked by a dark dotted line).

Source: [17]

Как указывалось, степень влияния тропосферных и стратосферных механизмов зависит от региона и времени года. В тропической области в течение всего года преобладают термодинамические процессы (конвекция) в неустойчивой тропосфере, а в полярных широтах – стратосферный озоновый механизм. В зоне средних широт, в которой располагается Беларусь, в летний период существенное влияние оказывают тропосферные процессы, а при переходе в зимний период начинает превалировать и играть существенную роль озоновый механизм [3].

Материалы и методы

Статистический анализ связей стратосферных процессов и приземной циркуляции атмосферы проводился с использованием следующих данных мониторинга стратосферного озона и приземной температуры воздуха:

- спутниковые данные (OMI/OMPS), представленные средненежными значениями ОСО в узлах геодезической сетки $1,10 \times 2,50$ за периоды 1979–1992 и 1997–2016 гг. и картами полей ОСО [18; 19].

На основании этих материалов получены временные ряды значений ОСО для нескольких среднеширотных озонметрических станций: городов Бельска (Польша, 51,84° с. ш., 20,79° в. д.), Потсдама (Германия, 52,22° с. ш., 13,05° в. д.) и Минска (53,83° с. ш., 27,47° в. д.). Спутниковые данные использовались ввиду того, что величины наземных измерений (в силу методики измерений по прямому солнцу) носят дискретный характер и вследствие этого плохо пригодны для статистического анализа. Проведенный нами сравнительный анализ наземных и спутниковых данных показал, что, несмотря на некоторые различия в значениях ОСО, их величины, временной ход (межсезонные изменения и тенденции) характеризуются хорошим совпадением. Многолетние средние (ежедневные и среднемесячные) значения за период 1997–2016 гг., полученные для рассматриваемых регионов, определялись как климатическая норма;

- карты распределения полей ОСО и полей отклонений от многолетних средних значений из [19];
- метеорологические данные из [17] (1979–1992) и [20] (1997–2016). Климатическая норма для приземной температуры воздуха г. Минска бралась за период 1961–1990 гг.

При анализе связи ОСО с циркуляционными процессами использована классификация циркуляционных механизмов по Б. Л. Дзердзеевскому [21]. Связь полей ОСО с тропосферными температурами выявлялась с помощью корреляционного анализа для временных рядов годовой длины (365 дней), а также для отдельных сезонов.

Использовались численная модель GFS (Global Forecast System) [22] и численная мезомасштабная модель *WRF version 3.9*. Для визуализации экспериментальных данных и построения карт ОСО над Беларусью и приграничной территорией методом интерполяции значений в указанных точках применялась программа *ArcGis*. Данные спутникового мониторинга ОСО брались по координатам следующих городов: Минска, Могилёва, Витебска, Гродно, Бреста, Гомеля, Полоцка, Пинска, Киева, Львова, Варшавы, Люблина, Даугавпилса, Вильнюса, Пскова, Рославля, Смоленска, Брянска.

Исходные материалы для численного математического расчета моделью *WRF version 3.9* синоптической ситуации 13 июля 2016 г. над территорией Беларуси следующие:

- расчетная сетка с шагом 15 и 3 км;
- 35 уровней по вертикали, до 50 гПа;
- картографическая проекция Ламберта;
- параметризация микрофизики *WRF Single moment 6 class Scheme*;
- параметризация облачности *Grell 3D Ensemble Scheme*.

Результаты и их обсуждение

Статистическая оценка стратосферно-тропосферных связей для региона Республики Беларусь.

Совместный анализ ежедневных и среднемесячных значений ОСО и температуры изобарической поверхности 1000 мбар (T_{1000}) за периоды 1979–1992 и 1997–2016 гг. показал, что в летний период изменения ОСО над рассмотренными регионами происходят синхронно с изменением T_{1000} (рис. 2). Зимой эта связь нарушается и снова восстанавливается весной. Для всего исследуемого периода получена статистически значимая антикорреляция между ежедневными значениями температур воздуха T_{1000} и ОСО. Величины коэффициентов корреляции испытывают межгодовую изменчивость и составляют от $-0,6$ до $-0,8$.

Для уточнения корреляционной зависимости между ОСО и приземной температурой воздуха были использованы значения ОСО (спутник ОМІ) для г. Минска и данные наблюдений Белгидромета указанной температуры за период 1997–2016 гг. Полученные ежедневные значения рассчитывались в среднемесячные и среднегодовые. Для корреляционной связи рассматривались отклонения среднемесячных величин ОСО и T_{1000} от их климатической нормы. Результаты приведены в табл. 1.

Средний годовой корреляционный коэффициент составил $-0,32$. В отдельные годы он достигает $-0,7$. Наибольшие сезонные многолетние коэффициенты наблюдаются осенью ($-0,37$) и летом ($-0,44$). В некоторые сезоны коэффициент может достигать $-1,0$ или, наоборот, положительного значения: от $0,4$ до $0,7$.

Исследование динамики ОСО над территорией республики выявило ее связь с глобальными циркуляционными процессами в тропосфере. Так, годовой максимум среднемесячных значений ОСО в период 1997–1992 гг. наблюдался в апреле, а с середины 1990-х гг. до 2009 г. он переместился на более ранние сроки и отмечался в марте.

Для определения связи ОСО с колебаниями тропосферных циркуляционных процессов была использована типизация макромасштабных атмосферных циркуляционных процессов по Б. Л. Дзердзеевскому (так называемые элементарные циркуляционные механизмы – ЭЦМ) и соответствующий календарь смены ЭЦМ над европейским сектором Северного полушария. Рассчитана частота повторяемости основных групп циркуляционных процессов для весенних месяцев. Выяснилось, что в период 1979–1997 гг. в апреле, когда наблюдается максимум среднемесячных значений ОСО, количество дней с меридиональной северной циркуляцией испытывает значительный отрицательный тренд. А в период

1997–2009 гг. в марте, когда максимум среднемесячных значений ОСО сместился на более ранний месяц, количество дней с меридиональной северной циркуляцией растёт (рис. 3). Сопоставление количества дней с определённым типом циркуляции со среднемесячными величинами ОСО за те же периоды показывает, что смещение годового озонового максимума на более ранние сроки совпадает с колебаниями макромасштабных циркуляционных процессов в Северном полушарии.

При изучении долговременных тенденций озоносферы над территорией республики установлено замедление отрицательного тренда содержания озона, что соответствует оценкам глобальных тенденций в озоносфере Земли. Анализ среднемесячных значений ОСО для периода сильного отрицательного тренда ОСО (1979–2000) и замедления этого тренда (2000–2014) показал следующее. В первый период отрицательный тренд в той или иной мере был выражен во все сезоны. Начиная с 2000 г. величина отрицательного тренда для всех месяцев, за исключением июня и сентября, значительно снизилась, а в январе и феврале отмечается небольшой положительный тренд среднемесячных значений ОСО.

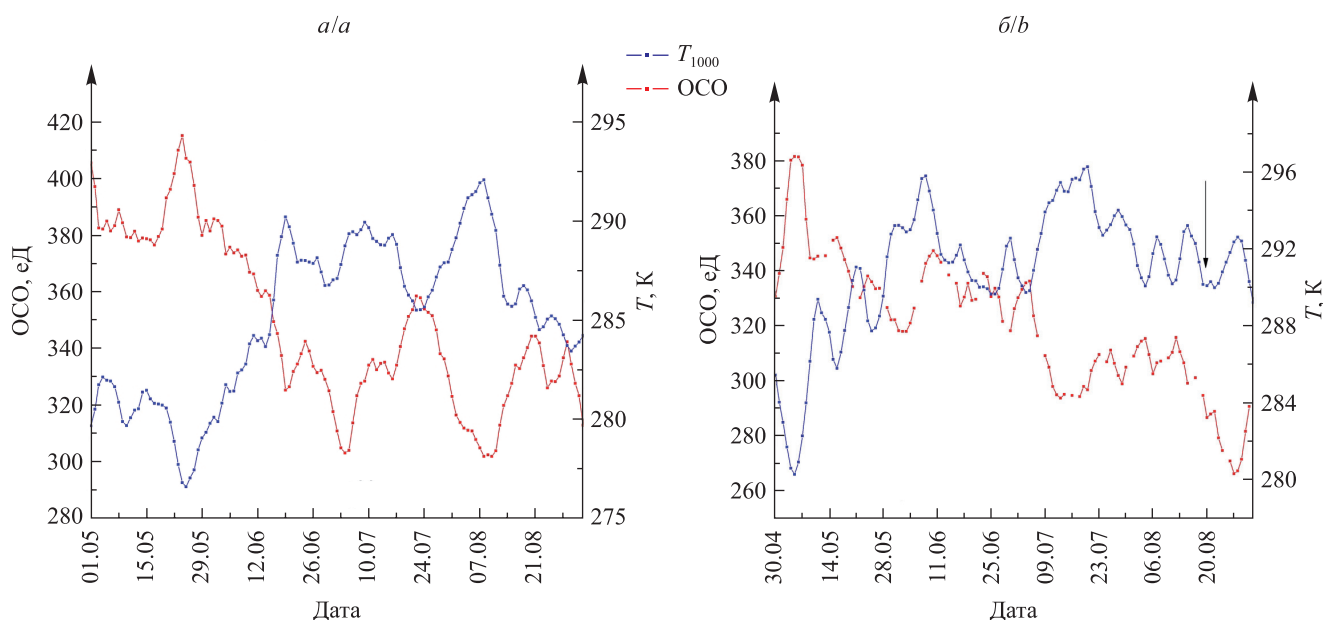


Рис. 2. Сглаженные 5-дневным скользящим средним ежедневные значения ОСО и температуры воздуха изобарической поверхности 1000 мбар: а – 1991 г.; б – 2011 г.

Fig. 2. Daily values of TO and surface air temperature of 1000 mbar smoothed by a 5-day moving average: а – 1991; б – 2011

Коэффициенты корреляции для вариаций ОСО

Correlation coefficients for variations

Коэффициент	Год									
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Годовой	0,35	−0,56	−0,46	−0,38	−0,76	−0,40	−0,24	−0,20	−0,20	−0,37
Весна (МAM)	0,92	−1,00	−0,80	−0,37	−0,55	−0,66	−0,52	−0,93	−0,83	0,42
Лето (ИИА)	−0,93	−0,98	−1,00	−0,54	−0,94	−0,88	−0,98	−0,92	−0,29	−0,49
Зима (ЯФМ)	0,36	−0,82	−0,95	0,79	−0,86	0,48	−0,24	0,86	0,13	0,59
Осень (СОНД)	0,36	−0,99	−0,31	−0,21	−0,87	−0,02	−0,78	0,62	−0,93	−0,93

Примечание. Красным фоном помечены наиболее высокие коэффициенты антикорреляции, желтым – средние, март; СОНД – сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили наличие связи между динамикой полей ОСО (или динамикой стратосферного озона) и циркуляционными процессами тропосферы в нашем регионе. Высокий коэффициент корреляции между ОСО и приземными температурами воздуха свидетельствует о том, что в теплое время года на высоту тропопаузы большое влияние оказывают тропосферные конвективные процессы, в холодное время года, очевидно, высота тропопаузы формируется за счет стратосферных процессов, изменений поля ОСО.

Гипотеза влияния стратосферного озона (озонового механизма) на тропосферные процессы была применена к конкретной синоптической ситуации. Последняя отражает нарушение статистической связи ОСО и приземной температуры воздуха, которое наиболее часто проявляется, как уже было сказано выше, летом и весной. В то же время летом поле ОСО подвержено термодинамической деформации, но все же имеются ситуации, когда оно влияет на циркуляцию в тропосфере. Чаще всего это связано с прохождением озоновых аномалий.

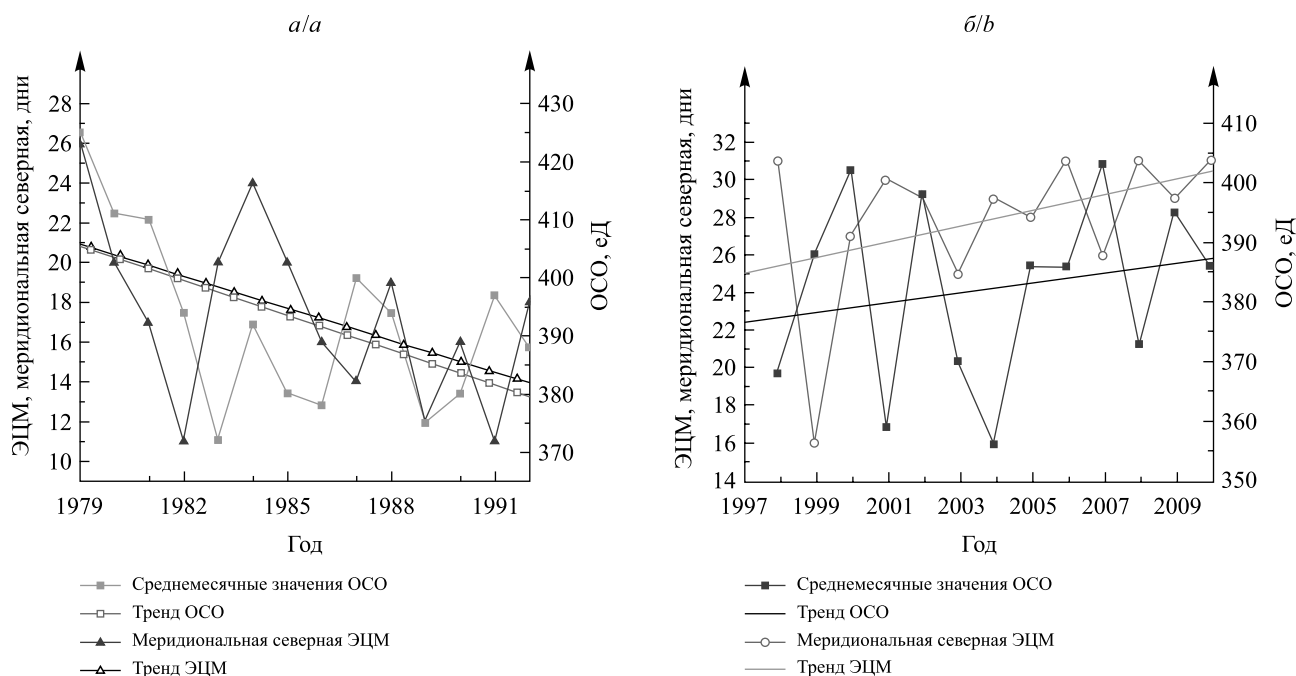


Рис. 3. Тренды среднемесячных значений ОСО и количества дней с меридиональной северной циркуляцией атмосферы над европейским сектором Северного полушария в период 1979–1993 гг. для апреля (а) и в период 1997–2009 гг. для марта (б)

Fig. 3. Trends in average monthly (April) values of TO and number of days with the northern meridional circulation over Europe sector of Northern hemisphere in the period of 1979–1993, April (a) and in the period of 1997–2009, March (b)

Таблица 1

и приземной температуры воздуха (г. Минск)

Table 1

of TO and surface air temperature (Minsk)

Год										
2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Среднее
-0,20	-0,36	-0,49	-0,59	-0,31	0,07	-0,66	-0,62	-0,18	-0,55	-0,32
-0,76	-0,28	-0,78	-0,77	-0,71	0,28	-1,00	-0,98	-0,97	-0,81	-0,36
-0,98	-0,92	0,26	0,41	0,30	-0,17	-1,00	-0,77	-0,88	-1,00	-0,44
-0,28	-0,01	-0,24	0,62	-0,01	-0,55	-0,78	-0,72	0,74	-0,82	-0,31
-0,15	-0,56	-0,84	-0,86	0,37	0,78	-0,39	0,66	-0,66	0,21	-0,37

белым – низкие и зеленым – положительные. МАМ – март, апрель, май; ИИА – июнь, июль, август; ЯФМ – январь, февраль,

Анализ верхней атмосферы и численные расчеты тропосферы 10–13 июля 2016 г. В указанный период над территорией Беларуси прошел мощнейший за всю историю страны ураган с порывами ветра до 21 м/с, который, по сводкам Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, повредил 510 населенных пунктов. Наша республика находилась в промежуточной зоне между глубоким циклоном, центр которого располагался над Кольским полуостровом, и антициклоном над Черным морем. Также по картам (500 гПа) видно, что через Беларусь проходил максимум волны Россби. Таким образом, данная синоптическая ситуация привела к стыку холодных и теплых масс, что создало неустойчивость в атмосфере и обусловило образование мини-циклона над территорией Карпатских гор.

Для территории Беларуси расчетные карты модели *WRF* были визуализированы на 13 июля 2016 г. с разным шагом разрешения – 3 и 15 км – и временным интервалом 1 ч для более подробного, детального и точного анализа синоптической ситуации. На рис. 4 представлено прохождение через страну мини-циклона с минимальным давлением в центре 1005 гПа. Районы, где выпало наибольшее количество осадков, – Гродненская, Минская и Витебская области.

Согласно определению Всемирной метеорологической организации, нижняя граница тропопаузы (соответственно верхняя – тропосферы) – это минимальная высота, на которой вертикальный градиент температуры падает до $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ (или ниже), и среднее значение этого параметра в вышележащем слое толщиной 2 км не превышает $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Толщина тропопаузы составляет от нескольких сотен метров до 2–3 км. Уровень высоты тропопаузы отражает основные особенности стационарных фронтов, которые имеют тесную взаимосвязь со стратосферно-тропосферными процессами. Для верхней части полярного стационарного фронта характерным является полярное струйное течение, которое образуется на стыке полярных и умеренных воздушных масс. Беларусь 10 июля 2016 г. находилась в зоне низкой высоты тропопаузы, а 13 июля – в зоне высокой высоты (рис. 5).

Карты изэнтропической поверхности отражают поверхности равной потенциальной температуры или энтропии. По картам 1,5 PVU на 10–13 июля можно сделать вывод о том, что Беларусь находилась в промежуточной зоне изэнтропической поверхности, которая характеризуется нестабильностью и неустойчивостью. Анализ струйных течений показал, что во все дни на территории страны преобладали сильные ветры и сам поток проходил непосредственно через Беларусь, что и привело к образованию порывистых ветров свыше 20 м/с (рис. 6).

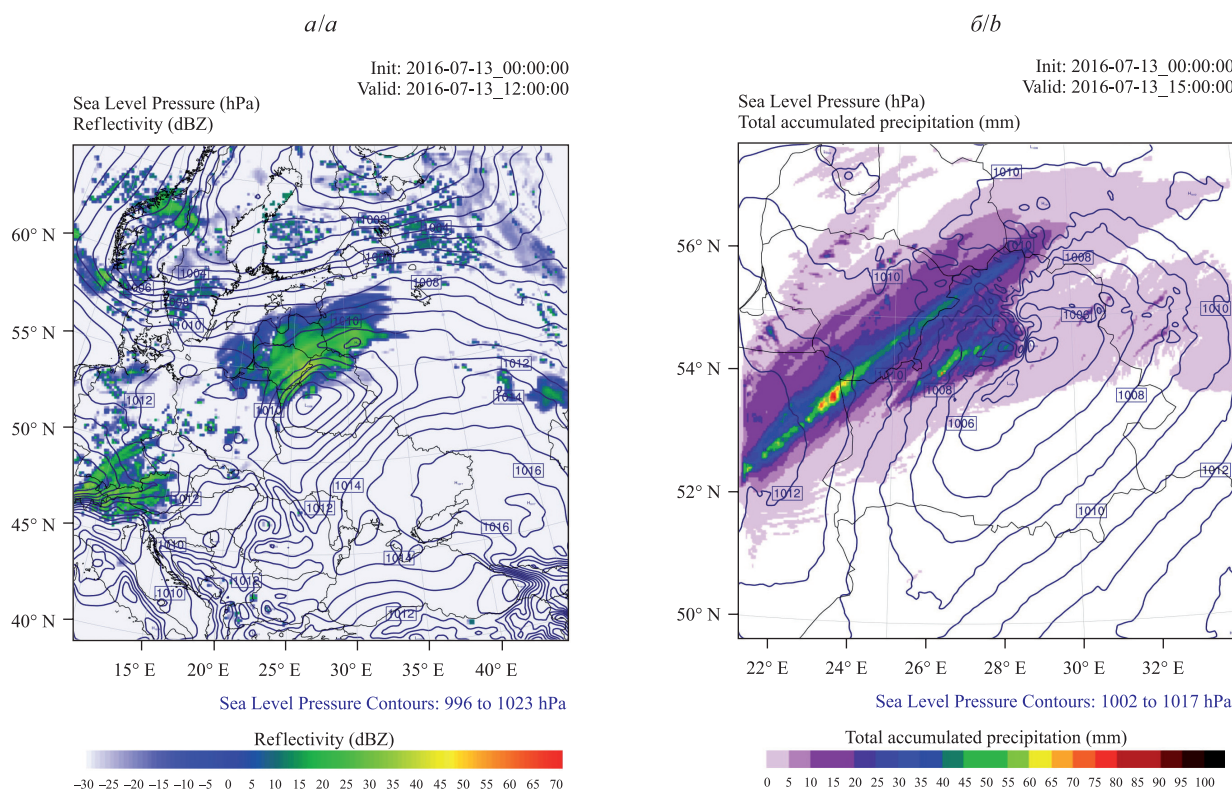


Рис. 4. Прохождение мини-циклона с юго-запада на северо-восток через территорию Беларуси 13 июля 2016 г.

Карта облачности и давления на 12 ч (а), карта осадков и давления на 15 ч (б)

Fig. 4. Mini-cyclone passing from the south-west to the north-east through the territory of Belarus on July 13, 2016. Map of cloudiness and pressure at 12:00 a. m. (a), a map of precipitation and pressure at 15:00 p. m. (b)

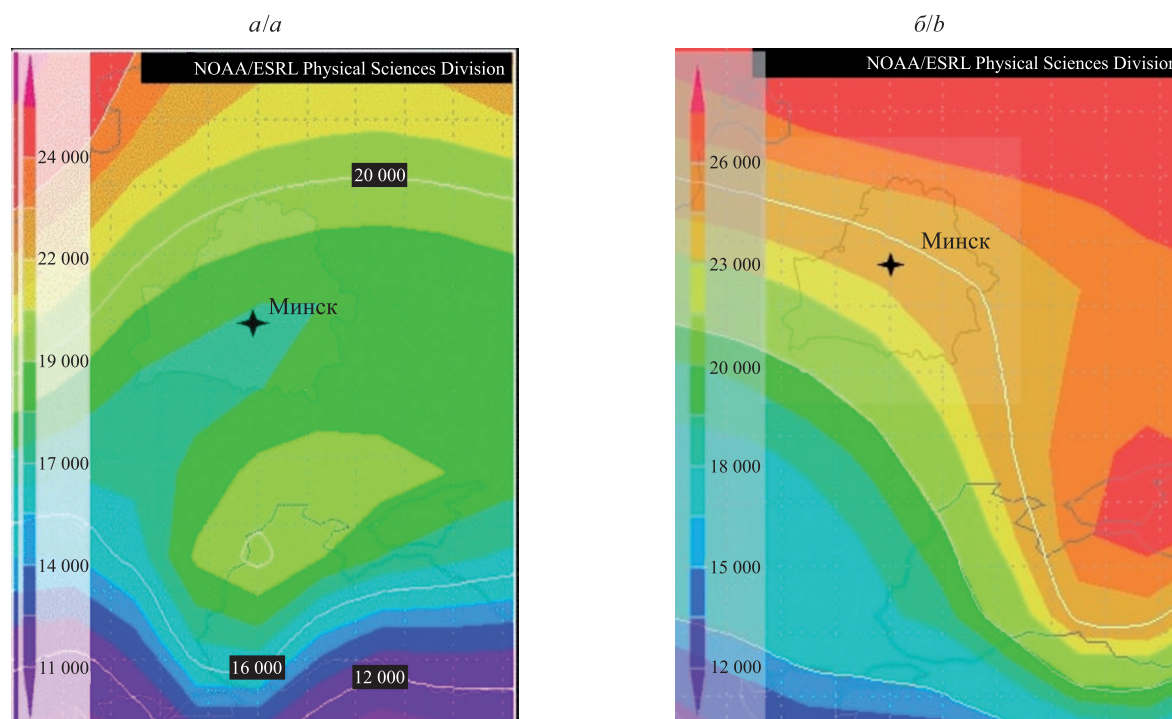


Рис. 5. Состояние уровня тропопаузы (Па) на 12 ч 10 июля (а) и 13 июля (б) 2016 г.
Источник: [19]

Fig. 5. State of the tropopause level at 12:00 a.m. on the 10th of July (a) and 13th of July (б), 2016.
Source: [19]

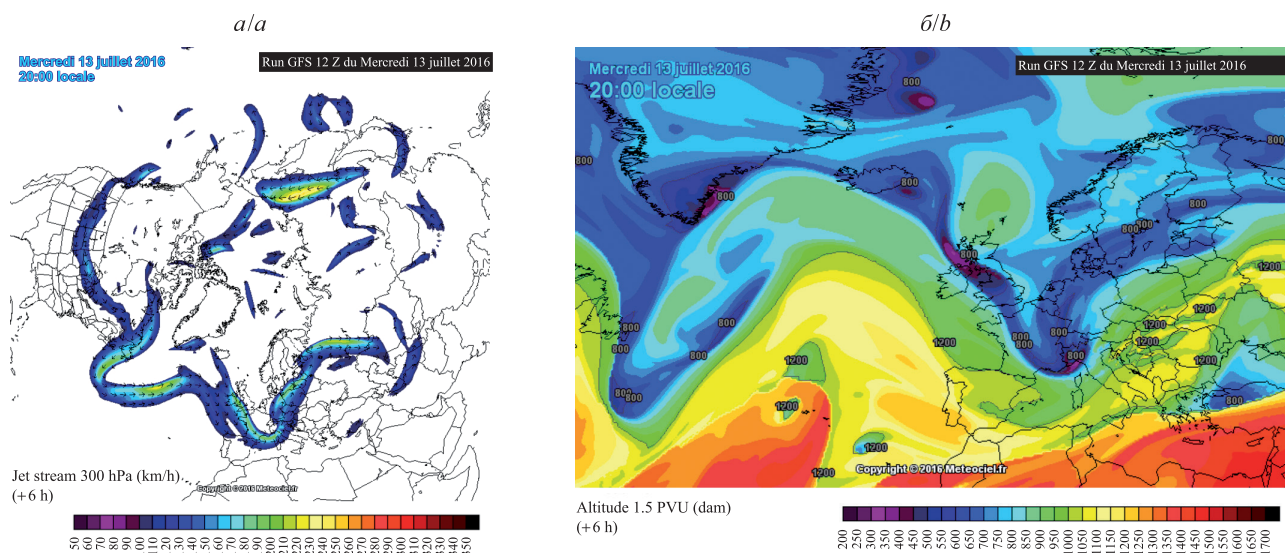


Рис. 6. Состояние струйных течений на высоте 300 гПа (а) и изэнтропической поверхности 1,5 PVU (б) на 12 ч 13 июля 2016 г.
Источник: [22]

Fig. 6. State of jet streams at an altitude of 300 hPa (a) and an isentropic surface of 1.5 PVU (б) at 12:00 a.m. on July 13, 2016.
Source: [22]

Данные реанализа (NOAA/NCEP) распределения скорости ветра за 10–13 июля 2016 г. над г. Минском также свидетельствуют об усилении скорости ветра на высоте 300 гПа. Максимальные значения наблюдались 12 и 13 июля (рис. 7).

Из вертикального распределения относительной влажности воздуха (рис. 8) во время прохождения мини-циклона видно, что 13 июля на севере страны влага (относительная влажность 75–90 %) достигала самых верхних уровней высот 200–300 гПа, проникая в стратосферу и тем самым разрушая поле ОСО. А 14 июля, когда циклон ушел с территории Беларуси, наблюдается низкая относительная влажность воздуха (10–30 %) в верхней части всего разреза.

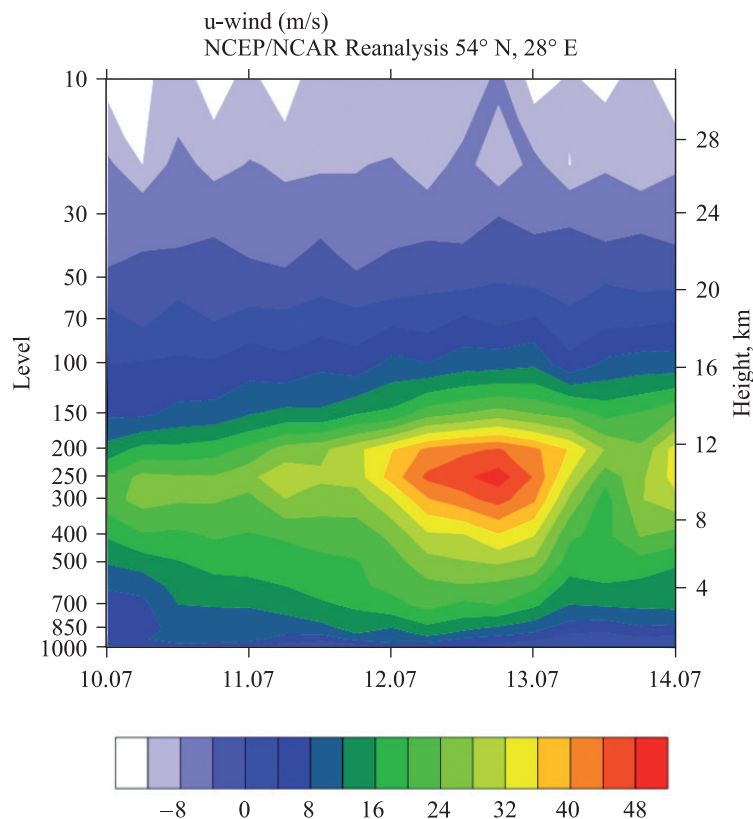


Рис. 7. Вертикальный разрез распределения скорости ветра над г. Минском 10–13 июля 2016 г.

Источник: [19]

Fig. 7. Vertical profile of zonal wind for the city of Minsk, July 10–13, 2016.

Source: [19]

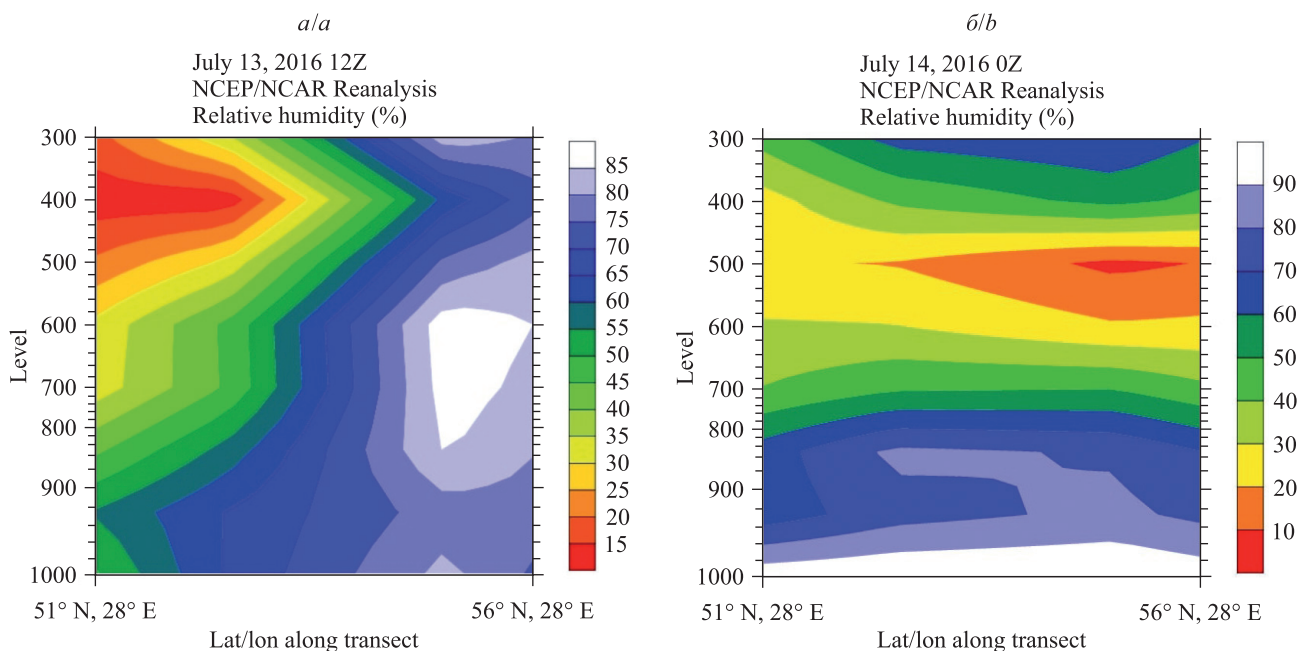


Рис. 8. Вертикальный разрез распределения относительной влажности воздуха для территории Беларуси по широте 28° на 13 июля (а) и 14 июля (б) 2016 г.

Источник: [19]

Fig. 8. Vertical profile of air relative humidity for the territory of Belarus at the latitude of 28° on the 13 (a) and 14 (b) of July, 2016.

Source: [19]

Для более детального изучения приведенной ситуации были получены данные мониторинга по координатам спутниковых измерений ОСО в локальных точках для территории Беларуси и ближнего зарубежья (табл. 2). После интерполяции значений с одинаковыми показателями ОСО при помощи программы *ArcGIS* выяснилось, что поле ОСО имеет неоднородный характер.

При детальном анализе распределения ОСО (рис. 9) по всем городам Беларуси четко прослеживается его снижение перед ураганом, что связано с поступлением влаги в стратосферу. Минимум озона был достигнут 13 июля, после чего ОСО начало восстанавливаться. Интересно отметить, что 11–13 июля во всех областных городах ОСО было практически на одинаковом уровне, кроме Могилёва и Полоцка, где оно было выше примерно на 20–35 еД (см. табл. 2). Получается, что в поле ОСО имелись большие градиенты по линии Брест – Орша. На севере и юге наблюдались максимумы ОСО, которые понизили высоту тропопаузы, что и создало определенный узкий пространственный коридор с юго-запада на северо-восток, по которому проходил мини-циклон, сформировавшийся буквально за полсутки в районе Карпат (см. рис. 4).

Таблица 2

Распределение ОСО над городами Беларуси и ближнего зарубежья, еД

Table 2

Distribution of TO for cities of Belarus and border areas, DU

Дата	Витебск	Гомель	Гродно	Брест	Минск	Могилёв	Пинск	Полоцк	Киев
08.07.2016	356	357	343	369	365,5	358	340	345	367
09.07.2016	355	346	360	373	353	344	338	344	357
10.07.2016	346	337,5	338	335	345	345	358	343	374
11.07.2016	326	329	316	315	317	331	370	371	369
12.07.2016	316	313	305	309	311,5	321	339	336	313
13.07.2016	297	308	303	307	306	325	314	330	312
14.07.2016	299,5	303,5	313	312,5	308,5	316	321	362	300
15.07.2016	302	299	323	318	311	308	336	350	325
16.07.2016	305	283	311	310	299	308	315	312	313

Дата	Львов	Люблин	Варшава	Смоленск	Псков	Рославль	Брянск	Вильнюс	Даугавпилс
08.07.2016	360	342	341	334	352	343	346	354	345
09.07.2016	357	349	345	339	350	338	338	349	345
10.07.2016	366	355	344	356	343	358	362	347	352
11.07.2016	372	371	369	364	355	362	342	360	361
12.07.2016	330	347	322	323	351	322	315	372	353
13.07.2016	309	314	314	324	331	330	307	322	335
14.07.2016	298	304	322	362	354	364	310	335	364
15.07.2016	308	310	324	338	371	337	334	347	353
16.07.2016	316	318	325	305	318	316	329	306	315

Воздуху, который насыщен влагой и ограничен с двух сторон (северная и южная части Беларуси) низкой высотой тропопаузы и высокими значениями ОСО, пришлось продвигаться по узкому коридору с большой высотой тропопаузы и низкими значениями ОСО. Эта ситуация напоминает известную задачу решения уравнения Бернулли, когда скорость потока увеличивается в месте сужения русла.

Данный пример хорошо иллюстрирует основные положения гипотезы озонового механизма влияния на погодные процессы и региональный климат и дополняет понимание развития атмосферных процессов: изменение высоты тропопаузы (или ОСО) над конкретной воздушной массой может изменить интенсивность и общий характер тропосферной циркуляции в определенном районе. Анализ и численный расчет показали, что даже летом в условиях, когда ОСО играет как бы вторичную роль в циркуляции атмосферы, все же при озоновых аномалиях (положительных или отрицательных) влияние происходит по сценарию (зимнего) озонового механизма воздействия на тропосферную циркуляцию.

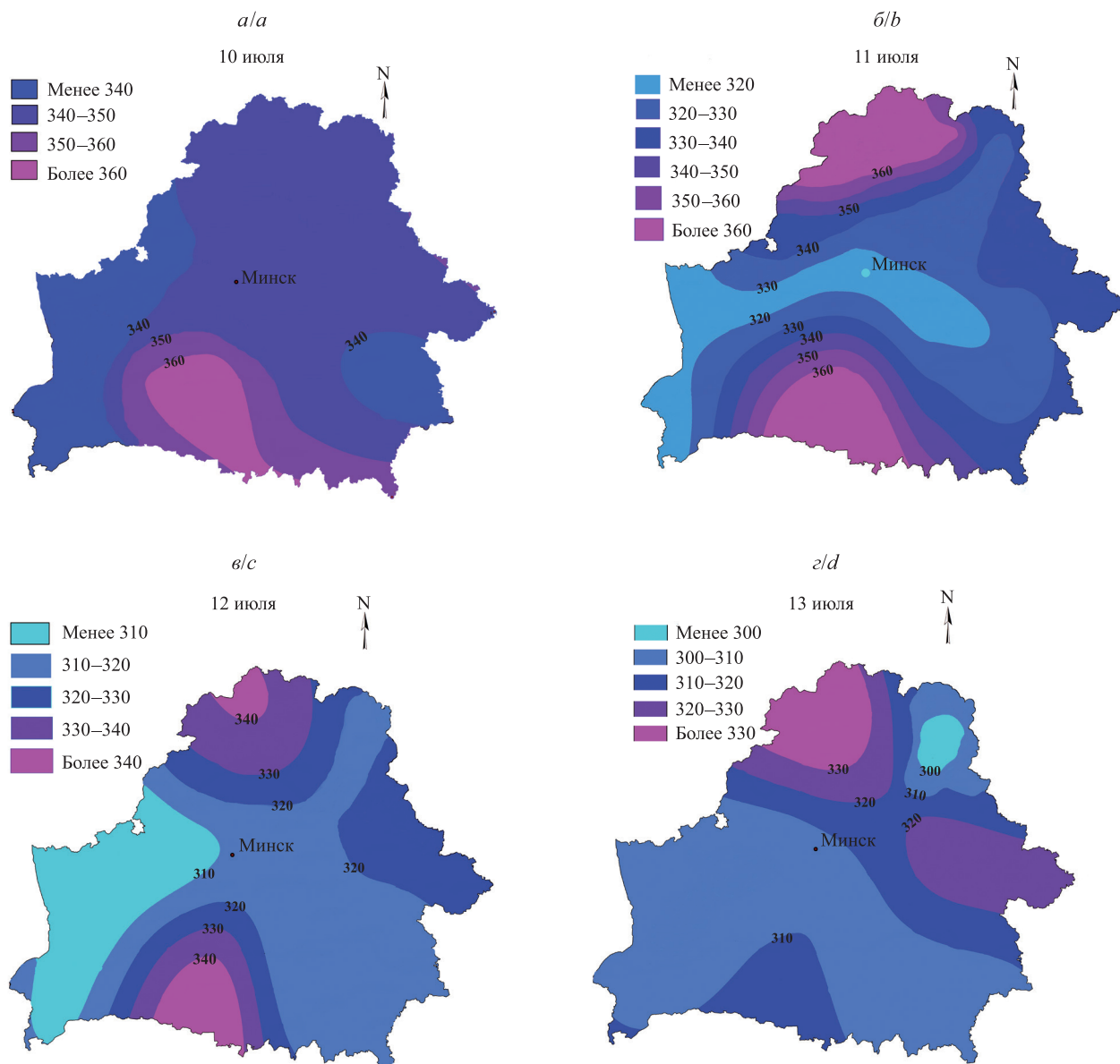


Рис. 9. Распределение ОСО (еД) над территорией Беларуси 10–13 июля 2016 г. (а – г)
Fig. 9. Distribution of TO (DU) over the territory of Belarus for July 10–13, 2016 (a – d)

Таким образом, летние резкие перепады ОСО могут приводить к сильным перепадам уровня тропопаузы, появлению мощных струйных течений и, как следствие, – ухудшению погодных условий в нижней тропосфере.

Закключение

В результате статистической обработки многолетних данных мониторинга ОСО установлена устойчивая антикорреляционная связь между колебаниями отклонений приземной температуры и отклонений ОСО для г. Минска за период 1979–1992 гг. Средний многолетний коэффициент антикорреляции равен $-0,39$ (с наибольшими коэффициентами в отдельные годы от $-0,6$ до $-0,8$). Для периода 1997–2016 гг. среднегодовое значение корреляционного коэффициента составило $-0,32$. Наибольшие сезонные многолетние значения коэффициента антикорреляции отмечаются осенью ($-0,37$) и летом ($-0,44$). В некоторые сезоны он достигает значений как $-1,0$, так и $+0,7$.

Подтвердилась правомерность концепции озонового механизма развития атмосферных процессов. Суть концепции заключается в том, что поле ОСО формируется за счет конкуренции двух механизмов, один из которых (радиационный) отвечает за образование этого вещества в верхней стратосфере и понижает высоту тропопаузы, другой, традиционный (термодинамический), действующий в тропосфере,

создает условия для поднятия высоты тропопаузы, в результате чего ОСО уменьшается. Сам механизм воздействует не напрямую, а посредством изменения положения глобальных циркуляционных ячеек (с характерными элементами – стационарными фронтами, струйными течениями и уровнем высоты тропопаузы).

В процессе статистического анализа был установлен факт нарушения корреляции ОСО и приземной температуры во время весенне-летних озоновых аномалий. Для выяснения причин этих отклонений рассмотрен конкретный случай экстремального погодного явления в летний период. Пример урагана 10–13 июля 2016 г. в Беларуси иллюстрирует частичное влияние стратосферных процессов на формирование приземной погоды. Оно характеризовалось наличием мощных струйных течений в области верхней тропосферы – нижней стратосферы, больших градиентов в поле распределения ОСО, которые воздействовали на уровень высоты тропопаузы. Этот пример дополняет понимание развития атмосферных процессов, в частности, изменение высоты тропопаузы (или ОСО) может изменять тропосферную циркуляцию не только в зимний период, но и в летний, когда наблюдаются озоновые аномалии.

Таким образом, статистически, экспериментально и методом моделирования установлено, что даже летом стратосферные процессы (а именно изменения ОСО) могут влиять на погоду в тропосфере и способствовать появлению опасных метеорологических явлений, таких как ураганные ветры.

Работа является частью научного проекта «Разработка методов анализа спутниковой информации для оценки влияния озонового механизма на качество прогнозирования атмосферных процессов в Республике Беларусь» в рамках государственной программы «Информатика, космос и безопасность» на 2016–2020 гг.

Библиографические ссылки

1. Логинов ВФ, Микуцкий ВС. *Изменения климата: тренды, циклы, паузы*. Минск: Беларуская навука; 2017. 179 с.
2. Чижевский АЛ. *Земное эхо солнечных бурь*. Москва: Мысль; 1976. 367 с.
3. Красовский АН, Турышев ЛН, Светашев АГ, Бородко СК, Жучкевич ВВ. Озоновый механизм управления региональным климатом и погодой. *Наука и инновации*. 2016;9:17–20.
4. Хргиан АХ. *Физика атмосферного озона*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1973. 291 с.
5. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. Report No. 55. *World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project*. Geneva: WMO; 2015.
6. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. WMO Report No. 52. *World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project*. Geneva: WMO; 2011.
7. Kleinschmidt E. Über Aufbau und Entstehung von Zyclonen (3. Teil). *Meteorologische Rundschau*. 1950;4:89–96.
8. Иванова АР. Динамика тропопаузы для случаев резкого изменения озона в умеренных широтах Северного полушария. *Метеорология и гидрология*. 2011;7:13–25.
9. Bojkov RD, Zerefos CS, Balis DS, Ziomas IC, Bais AF. Record low total ozone during northern winters of 1992 and 1993. *Geophysical Research Letters*. 1993;20(13):1351–1354.
10. Reader MC, Kent Moore GW. Stratosphere-troposphere interactions associated with a case of explosive cyclogenesis in the Labrador Sea. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 1995;47(5):849–863.
11. Holton JR, Haynes P, McIntyre ME, Douglass AR, Rood RB, Pfister L. Stratosphere-troposphere exchange. *Reviews of Geophysics*. 1995;33:403–439.
12. Hudson RD, Andrade MF, Follette MB, Frolov AD. The total ozone field separated into meteorological regimes. Part II: Northern Hemisphere mid-latitude total ozone trends. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2006;6:5183–5191.
13. Шаламянский АМ. Концепция взаимодействия атмосферного озона и воздушных масс Северного полушария. *Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова*. 2013;568:173–194.
14. Турышев ЛН, Красовский АН, Жучкевич ВВ, Борковский НБ, Атрашевский ЮИ, Цвирко МП, Сикорский ВВ. Методика краткосрочного прогноза ультрафиолетового индекса в районе г. Минска. *Природные ресурсы*. 2005;1:15–25.
15. Barodka S, Krasouski A, Lapo P, Svetashev A, Schlender T, Turishev L, Yakautsava Y, Zhuchkevich V. Dynamical structure and formation mechanisms of local ozone anomalies. In: *Quadrennial ozone symposium; 2016 September 4–9; Edinburgh, United Kingdom*. Edinburgh: [publisher unknown]; 2016.
16. Schlender T, Zhuchkevich V, Krasouski A, Barodka S, Mitskevich Y, Shalamyansky A, et al. Characteristics of the stratospheric ozone influence on tropospheric circulation. In: *Challenges for Climate Science – Synergies between SPARC and the WCRP Grand Challenges; 2016 October 31 – November 1; Berlin, Germany*. Berlin: [publisher unknown]; 2016.
17. NCEP/NCAR Reanalysis 1 [Internet]. [Cited 2017 February 17]. Available from: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>.
18. OMI/OMPS Ozone Data archive [Internet]. [Cited 2017 March 20]. NOAA. Available from: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/neubrew/SatO3DataTimeSeries.jsp>.
19. World Ozone Monitoring and Mapping Centre. Environment Canada [Internet]. [Cited 2017 February 15]. Available from: <http://es-ee.tor.ec.gc.ca/e/ozone/ozoneworld.htm>.
20. Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды. *Архив погоды* [Интернет]. [Прочитано 11 января 2017 г.]. Доступно по: http://rp5.by/archive.php?wmo_id=26850&lang=ru.
21. Кононова НК. *Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому*. Москва: Воентехиздат; 2009. 372 с.
22. Site de météorologie en temps réel, Observations, prévisions, modèles [Internet]. France: Météociel; 2004–2017 [cited 2017 February 15]. Available from: http://www.meteociel.fr/modeles/gfse_cartes.php.

References

1. Loginov VF, Mikutsky VS. *Izmeneniya klimata: trendy, tsikly, pauzy* [Climate change: trends, cycles, pauses]. Minsk: Belaruskaya navuka; 2017. 179 p. Russian.
2. Chizhevsky AL. *Zemnoe ekho solnechnykh bur'* [Earth echo of solar storms]. Moscow: Mysl'; 1976. 367 p. Russian.
3. Krasovsky AN, Turyshv LN, Svetashev AG, Borodko SK, Zhuchkevich VV. Ozone mechanism of regional climate and weather control. *Nauka i innovatsii*. 2016;9:17–20. Russian.
4. Khrigian AKh. *Fizika atmosfernogo ozona* [Physics of atmospheric ozone]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1973. 291 p. Russian.
5. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. Report No. 55. *World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project*. Geneva: WMO; 2015.
6. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. WMO Report No. 52. *World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project*. Geneva: WMO; 2011.
7. Kleinschmidt E. Über Aufbau und Entstehung von Zyclonen (3. Teil). *Meteorologische Rundschau*. 1950;4:89–96.
8. Ivanova AR. Dynamics of the tropopause for the cases of sharp changes in total ozone at the midlatitudes of the northern hemisphere. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2011;7:13–25. Russian.
9. Bojkov RD, Zerefos CS, Balis DS, Ziomias IC, Bais AF. Record low total ozone during northern winters of 1992 and 1993. *Geophysical Research Letters*. 1993;20(13):1351–1354.
10. Reader MC, Kent Moore GW. Stratosphere-troposphere interactions associated with a case of explosive cyclogenesis in the Labrador Sea. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 1995;47(5):849–863.
11. Holton JR, Haynes P, McIntyre ME, Douglass AR, Rood RB, Pfister L. Stratosphere-troposphere exchange. *Reviews of Geophysics*. 1995;33:403–439.
12. Hudson RD, Andrade MF, Follette MB, Frolov AD. The total ozone field separated into meteorological regimes. Part II: Northern Hemisphere mid-latitude total ozone trends. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2006;6:5183–5191.
13. Shalamyansky AM. [The concept of the interaction of atmospheric ozone and air masses of the Northern Hemisphere]. *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A. I. Voeikova*. 2013;568:173–194. Russian.
14. Turyshv LN, Krasovsky AN, Zhuchkevich VV, Borkovsky NB, Atrashevsky YuI, Tsvirko MP, Sikorsky VV. [Development of a short-term ultraviolet index forecasting method in the area of Minsk]. *Prirodnye resursy*. 2005;1:15–25. Russian.
15. Barodka S, Krasouski A, Lapo P, Svetashev A, Schlender T, Turishev L, Yakautsava Y, Zhuchkevich V. Dynamical structure and formation mechanisms of local ozone anomalies. In: *Quadrennial ozone symposium; 2016 September 4–9; Edinburgh, United Kingdom*. Edinburgh: [publisher unknown]; 2016.
16. Schlender T, Zhuchkevich V, Krasouski A, Barodka S, Mitskevich Y, Shalamyansky A, et al. Characteristics of the stratospheric ozone influence on tropospheric circulation. In: *Challenges for Climate Science – Synergies between SPARC and the WCRP Grand Challenges; 2016 October 31 – November 1; Berlin, Germany*. Berlin: [publisher unknown]; 2016.
17. NCEP/NCAR Reanalysis 1 [Internet]. [Cited 2017 February 17]. Available from: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>.
18. OMI/OMPS Ozone Data archive [Internet]. [Cited 2017 March 20]. NOAA. Available from: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/neubrew/SatO3DataTimeSeries.jsp>.
19. World Ozone Monitoring and Mapping Centre. Environment Canada [Internet]. [Cited 2017 February 15]. Available from: <http://es-ee.tor.ec.gc.ca/e/ozone/ozoneworld.htm>.
20. Republican center for hydrometeorology, control of radioactive contamination and environmental monitoring. *Arkhiv pogody* [Internet]. [Cited 2017 January 11]. Available from: http://rp5.by/archive.php?wmo_id=26850&lang=ru. Russian.
21. Kononova NK. *Klassifikatsiya tsirkulyatsionnykh mekhanizmov Severnogo polushariya po B. L. Dzerdzhevskom* [Classification of the circulation mechanisms of the Northern Hemisphere according to B. L. Dzerdzhevsky]. Moscow: Voenekhinizdat; 2009. 372 p.
22. Site de météorologie en temps réel, Observations, prévisions, modèles [Internet]. France: Meteociel; 2004–2017 [cited 2017 February 15]. Available from: http://www.meteociel.fr/modeles/gfse_cartes.php.

Статья поступила в редакцию 04.04.2018.
Received by editorial board 04.04.2018.