

УДК 551.513.510.42

## Режимы крупномасштабной циркуляции атмосферы над Азией в периоды формирования экстремально высокой приземной концентрации озона в районе г. Томска (Западная Сибирь)

О.Ю. Антохина<sup>✉</sup>, П.Н. Антохин, В.Г. Аршинова, М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, С.Б. Белан, Д.К. Давыдов, Г.А. Ивлев, А.В. Козлов, Т.М. Рассказчикова, Д.Е. Савкин, Д.В. Симоненков, Т.К. Скляднева, Г.Н. Толмачев, А.В. Фофонов\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 20.09.2022 г.;  
после доработки 3.11.2022 г.;  
принята к печати 7.12.2022 г.

На основе данных реанализа ERA5 и среднесуточных приземных концентраций озона ( $O_3$ ), измеряемых на TOR-станции с 1993 по 2020 г., исследован режим циркуляции, способствующий формированию экстремально высоких концентраций озона (95-й перцентиль, далее  $O_395$ ). Обнаружено, что для всех месяцев прослеживается идентичный режим циркуляции, сопровождающийся повышением приземной температуры воздуха в районе, охватывающем станцию измерения концентрации озона. Помимо повышения температуры воздуха для событий  $O_395$  характерно усиление юго-западной составляющей поля скорости ветра. Обнаружено, что эти циркуляционные особенности связаны с развитием меридиональности, вероятно, обусловленной распространением волн в верхней тропосфере умеренных широт. Выявленный циркуляционный режим способствует одновременно трансграничному переносу озона и его предшественников из южных районов, усилению фотохимического образования  $O_3$ , а также появлению природных пожаров.

*Ключевые слова:* приземная концентрация озона, циркуляция атмосферы, режимы, воздушные массы, баланс; the surface ozone concentration, atmospheric circulation, pattern, air mass, budget.

### Введение

Исследование тропосферного озона представляет большой интерес с точки зрения его влияния на климат и биосферу в целом [1–16]. До 90% озона находится в стратосфере, где он защищает биосферу от жесткого ультрафиолетового излучения.

\* Ольга Юрьевна Антохина (antokhina@iao.ru); Павел Николаевич Антохин (apn@iao.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан (bsb@iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Денис Евгеньевич Савкин (sde@iao.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Татьяна Константиновна Скляднева (tatyana@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@ipc.tsc.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

Остальные 10% озона находятся в тропосфере, где он является четвертым по значимости парниковым газом [1]. Озон играет ключевую роль в фотохимических реакциях, протекающих в тропосфере, особенно в нижней ее части – пограничном слое, где он является вторичным загрязнителем воздуха, образуясь из газов-предшественников. Также озон определяет окислительный потенциал тропосферы в силу своей высокой реакционной способности. Кроме того, будучи высокотоксичным газом, озон отрицательно воздействует на биосферу [1, 17]. Все эти негативные воздействия требуют детального исследования пространственно-временной изменчивости озона и механизмов его генерации и стоков в пограничном слое атмосферы.

Формирование вертикального распределения озона в пограничном слое атмосферы определяется балансом источников и стоков. Основные источники  $O_3$  в пограничном слое: интрузия из стратосферы, фотохимическая генерация из газов-предшественников, горизонтальный перенос и образование

его при молниевых разрядах. Стоками озона в пограничном слое являются: фотолиз, взаимодействие с газовыми компонентами (озонолиз), с аэрозолем, сухое осаждение и вымывание осадками [1]. Соотношение источников и стоков индивидуально для разных районов земного шара и определяется, в частности, наличием газов-предшественников (прекурсоров) озона, типом подстилающей поверхности, характером циркуляции атмосферы. Для юга Западной Сибири большую роль в формировании положительной части баланса озона играет его фотохимическое образование в пограничном слое атмосферы по сравнению с поступлением озона из вышележащих слоев атмосферы [17]. Фотохимическое образование озона крайне сложно и зависит от множества факторов, среди которых стоит отметить изначально наличие молекул озона, приходящую УФ-радиацию и температуру в приземном слое атмосферы [1].

Для Западной Сибири (Томская обл.) был выполнен ряд исследований влияния различных факторов на динамику среднесуточной концентрации озона в разные сезоны [18, 19]. На основе нейронных сетей, множественной линейной и авторегрессии были разработаны эмпирические модели изменчивости суточной концентрации  $O_3$  в зависимости от ряда предикторов (предшествующей концентрации озона, концентрации оксида азота, атмосферного давления, влажности, приходящей солнечной радиации, температуры воздуха) [18]. Было продемонстрировано, что среднесуточная концентрация  $O_3$  существенно зависит от температуры и солнечной радиации (коэффициенты корреляции 0,4 и 0,45 соответственно для всего исследуемого ряда наблюдений). В работе [19] была выявлена функциональная зависимость образования  $O_3$  от температуры воздуха на основе анализа периодов в различные сезоны года, когда температура устойчиво снижалась (волна холода) или повышалась (волна тепла), что сопровождалось понижением или повышением концентрации озона в приземном слое воздуха. Для исследуемого района характерна нелинейная функциональная зависимость образования  $O_3$  от температуры воздуха в приземном слое, причем нелинейный рост начинается при положительных температурах. Заметное усиление образования  $O_3$  отмечается при температуре воздуха  $> 10^\circ C$ .

Приведенные исследования свидетельствуют о том, что приземная температура воздуха в Западной Сибири является важнейшим фактором образования озона, особенно в теплый период года, когда среднесуточная температура устойчиво переходит через  $0^\circ C$  и показатели дневных температур достаточно высоки. Это подтверждается тем, что максимум концентрации  $O_3$  на станциях Западной Сибири отмечается, как правило, весной (март – май) либо летом (июнь-июль) [20]. Однако температура воздуха, помимо непосредственного влияния на скорость фотохимических реакций в атмосфере

может выступать как индикатор смены воздушной массы, поскольку во внутриконтинентальных районах Азии температура воздуха тесно связана с циркуляцией атмосферы за счет адвекции тепла и холода. Для Западной Сибири в публикациях [20–23] было показано, что концентрация озона существенно зависит от воздушных масс: для тропических и субтропических воздушных масс она максимальная, а для полярных и арктических – минимальная. Таким образом, зависимость между концентрацией приземного озона и температурой воздуха в определенные отрезки времени может быть обусловлена не только изменением скорости фотохимической генерации  $O_3$ , но и в значительной степени адвекцией воздушной массы с большим (меньшим) содержанием озона, по сравнению с фоновым.

Для Западной Сибири в [24] была продемонстрирована зависимость корреляции концентрации  $O_3$  и приземной температуры воздуха на межсуточных масштабах от синоптических условий. Для анализируемых ситуаций описываемая корреляция была выше при хорошо развитых адвекции и динамичной смене воздушных масс. Рост концентрации и температуры в районе станции измерений для случаев трех- и более кратного превышения суточных предельно допустимых концентраций (ПДК) озона происходит синхронно смене воздушных масс. Особенно выражена динамика  $O_3$  в случае последовательной смены арктической и субтропической воздушных масс. Также в [24] было показано, что максимальные концентрации  $O_3$  наблюдаются не в периоды блокирования западного переноса, а в периоды «предблокирования», т.е. максимального роста амплитуды волн (формирования гребней). Позднее в работе [25] на примере рекордных волн тепла 2020 г. в Сибири [26] были показаны схожие условия циркуляции. Одной из вероятных причин описанной выше закономерности является то, что блокинг в зрелой стадии (период «настоящего» блокинга) над Западной Сибирью обуславливают в большей степени аномалии в северных районах, а в стадии зарождения гребня и увеличения его амплитуды – в южных. Необходимо учитывать, что для блокингов, сопровождающихся экстремально интенсивными природными пожарами [27–30], условия формирования приземных концентраций  $O_3$  отличаются и зависят от интенсивности горения, изменения альbedo за счет дымового аэрозоля, а также особенностей растительности.

Можно резюмировать, что синоптические условия – ключевой фактор, влияющий на концентрацию озона. Поэтому в мировой практике всегда уделялось пристальное внимание циркуляционным типам формирования различных концентраций  $O_3$  [3–16]. Особенно важен анализ крупномасштабной циркуляции атмосферы, так как она является более предсказуемой и на ее основе можно делать долговременные оценки изменений газового состава. Авторы [3–16] связывают высокие концентрации приземного озона с антициклоническими условиями

циркуляции и/или тропическими-субтропическими воздушными массами. Однако в каждом из регионов земного шара особенности проявления таких типов циркуляции индивидуальны.

Представленная работа продолжает исследование особенностей циркуляции атмосферы для событий с максимальными концентрациями  $O_3$  в Западной Сибири. В отличие от предыдущих, цель настоящей работы — анализ циркуляции атмосферы во все месяцы года для случаев превышения суточной ПДК озона в соответствии с процентильными критериями.

## Данные и методы измерений

В работе использованы значения приземной температуры воздуха, геопотенциала на 500 гПа, горизонтальных компонент поля скорости на 850 гПа, а также потенциальной температуры на уровне динамической тропопаузы ( $PV-\Theta$ ) [31]. Данные взяты из архива реанализа ERA5 [32] с пространственным разрешением  $1,5^\circ \times 1,5^\circ$  за 1979–2020 гг. Результаты сравнения наземных метеорологических характеристик, измеряемых на станциях (температура воздуха, осадки и др.), с данными реанализа ERA5 (а также его предшественника ERA-Interim) [33, 34] показали их хорошее соответствие.

Для анализа использовались среднесуточные значения приземной концентрации  $O_3$  за 1993–2020 гг., регистрируемые на TOR-станции ( $56^\circ 28' 41''$  с.ш.,  $85^\circ 03' 15''$  в.д.) [35, 36]. Она представляет собой автоматический пост, который расположен в здании станции высотного зондирования ИОА СО РАН на северо-восточной окраине Академгородка г. Томска. Рядом со станцией отсутствуют крупные промышленные объекты и автомагистрали, что снижает влияние местных источников газа и аэрозоля. Приземная концентрация  $O_3$  на TOR-станции измеряется хемилюминесцентным газоанализатором типа 3-02П (разработан и изготовлен предприятием ЗАО «ОПТЭК», г. Санкт-Петербург), который регулярно калибруется с помощью генератора ГС-024-2 того же изготовителя. Забор воздуха на TOR-станции осуществляется через тефлоновые трубки высотой 5 м. Измерения на посту проводятся ежедневно и круглосуточно. Отсчеты производятся с частотой 1 Гц и затем усредняются за 10-минутный промежуток времени. Станция функционирует с декабря 1993 г. Более подробную информацию о данном poste мониторинга можно узнать в [35, 36].

События, характеризующиеся экстремально-высокими суточными концентрациями озона, были выбраны на основе анализа квантилей в распределении концентраций  $O_3$ . На рис. 1 (цв. вкладка) приведены графики годового хода концентрации озона, соответствующей процентилям от 90 до 99. Синей линией показано значение, соответствующее  $90 \text{ мкг/м}^3$  (трем суточным ПДК) [24]. Для весны и начала летнего сезона (апрель-май, начало июня) ЗПДК соответствуют 90-му и 95-му процентилям. Однако с учетом того, что баланс источников

и стоков  $O_3$  меняется, в остальные месяцы для этого процентильного диапазона суточные концентрации были ниже  $90 \text{ мкг/м}^3$ . Поэтому в данной работе мы унифицировали выборку для каждого месяца на основе порогового значения 95-го перцентиля. В результате мы получили в среднем по 30 событий для каждого месяца. Данные доступны в электронном виде по адресу: <https://bit.ly/3Dcchdp> (в тексте события обозначены  $O_395$ ).

Циркуляционные условия оценивались для области  $40\text{--}110^\circ$  в.д.,  $40\text{--}85^\circ$  с.ш. с помощью композитного анализа. Он применялся следующим образом: для каждой даты в диапазоне  $\pm 5$  дней рассчитывались средние метеорологические поля с 1979 по 2020 г., затем аномалия метеополя относительно среднего. В результате усреднения за каждый месяц получено итоговое поле, значимость которого оценивалась на уровне 0,05.

## Результаты и обсуждение

Экстремально высокие среднесуточные концентрации озона в районе TOR-станции формируются при схожих циркуляционных условиях во все месяцы. На рис. 2 (цв. вкладка) показаны композиты для линий тока поля скорости ветра, а также приземной температуры воздуха для июля, октября, января и апреля (распределения концентрации озона за каждый месяц доступны по ссылке <https://bit.ly/3Dcchdp>).

Приведенные композиты демонстрируют положительные аномалии температуры, в области которых можно видеть усиление линий тока поля скорости ветра на уровне 850 гПа, направленных с юго-запада на северо-восток. В средней тропосфере (рис. 3, цв. вкладка) указанным особенностям соответствует соседство крупномасштабной отрицательной аномалии геопотенциала и потенциальной температуры с запада от региона измерения озона и положительной аномалии этих величин с восточной. Менее выражены эти особенности летом. Таким образом, формирование  $O_395$  происходит при усилении бароклинности в атмосфере в передней части ложбины или циклона, локализованного к западу от региона исследований. Рост гребня антициклона к востоку сопровождается экстремальным выносом теплых воздушных масс.

Развитие ситуации с усилением ложбины и гребня над Уралом и Западной Сибирью происходит при распространении волн в верхней тропосфере. На рис. 4 (цв. вкладка) показан усредненный композит для меридиональной компоненты поля скорости ветра на уровне 250 гПа ( $V250$ );  $V250$  часто используется при упрощенном анализе распространения волн Россби [37].

Если для верхней тропосферы выделяется выраженная знакопеременная картина для  $V250$ , то можно предполагать, что имеет место распространение волновой цепочки. В нашем случае наиболее выраженные знакопеременные аномалии  $V250$

характерны для верхней тропосферы. Над Уралом и Западной Сибирью имеет место усиление двух ложбин и гребня. Установление устойчивой волновой картины, присутствующей во все месяцы, позволяет при определенных дополнениях в дальнейшем выстраивать прогнозы изменчивости озона различной заблаговременности от срочного (синоптический масштаб) до сверхдолгосрочного (десятилетия).

Полученный режим (рис. 4), а также обсуждаемые ранее отдельные синоптические ситуации, соответствующие  $O_3_{95}$ , позволяют еще раз подчеркнуть особенности, связанные с ростом амплитуды волн и формированием блокировок. Так, здесь мы на более обширном материале для каждого месяца продемонстрировали, что максимумы  $O_3$  формируются в периоды роста амплитуды волн, когда адвекция теплого воздуха максимальна. Можно предположить (см. рис. 4), что при финальном росте амплитуды и опрокидывании волны блокинг формируется к востоку от региона измерения — в районе долгот оз. Байкал. Такая схема демонстрировалась, например, в [38].

В работах [1, 39–43] рассматриваются основные составляющие баланса озона в Сибири. На основании рис. 1 и циркуляционного режима, способствующего повышению концентрации  $O_3$ , мы бы хотели обсудить возможные механизмы роста концентрации озона с учетом ряда закономерностей.

1. Холодный период (ноябрь – март). При отрицательных температурах и снежном покрове наибольшее влияние циркуляционный режим  $O_3_{95}$ , вероятно, оказывает на перенос озона из южных районов, а также на уменьшение стока  $O_3$  за счет  $NO_x$ .

2. Теплый период (апрель – октябрь). При положительных температурах и отсутствии снежного покрова механизмы повышения концентрации озона, обусловленные циркуляционным режимом  $O_3_{95}$ , более разнообразны. Здесь необходимо учитывать следующие условия: увеличение приземной температуры воздуха до аномальных положительных значений, увеличение приходящей УФ-радиации, а также перенос  $O_3$  и его предшественников из южных районов.

На основании настоящих данных и предыдущих исследований  $O_3_{95}$  можно сделать определенные предположения об основных механизмах для весеннего и осеннего (апрель–май, сентябрь–октябрь), а также летнего периода (июнь–август). Вероятно, весной и осенью в большей степени имеют место антропогенный перенос и влияние пожаров, а летом — усиление биогенных эмиссий. Концентрации 95-го перцентиля для весенних месяцев выше, чем для летних, из-за различия стоковой части баланса, а также, вероятно, мощности источников.

Помимо результатов, приведенных в [1, 39–43], на соотношение биогенных и антропогенных факторов указывает тот факт, что только для летнего периода мы обнаружили случаи  $O_3_{95}$  до начала 2000-х гг. Ранее обсуждалось [44], что в результате драматических событий в экономике стран СНГ

в 1990-х гг. существенно уменьшилось промышленное производство, что сильно повлияло на уменьшение газовых и аэрозольных компонент антропогенного происхождения. Отчасти «провал» экономики 1990-х может объяснить тот факт, что, за исключением летних месяцев, все случаи  $O_3_{95}$  отмечены после 2000-х гг. В летние месяцы усиливается фотохимия озона природного происхождения, поэтому до 2000-х гг. и после отмечено равное число случаев (с учетом нормировки на длину ряда).

К немаловажным факторам, которые необходимо обсудить в дальнейшем, следует отнести усиление меридиональности циркуляции атмосферы, однако оно может приводить как к появлению режима, показанного на рис. 4, так и режиму, когда регион измерения окажется под влиянием тыловой части ложбины, оказывающей противоположное влияние на концентрацию  $O_3$  [22, 23].

Кроме того, мы хотели бы подчеркнуть, что деление на теплый и холодный сезоны, а также весну, осень и лето, отмеченное выше, весьма условно вследствие особенностей циркуляции умеренных широт (так как пожары в южных регионах могут фиксироваться уже с конца марта и до начала ноября). Совокупность всех возможных путей увеличения озона до экстремальных значений требует в дальнейшем анализа отдельных случаев методами моделирования с поиском источников поступления примесей.

## Заключение

Исследованы режимы циркуляции атмосферы, способствующие формированию экстремально высоких концентраций озона. Изучены данные о концентрации  $O_3$ , полученные на ТОР-станции, расположенной в Академгородке г. Томска. В качестве порога исследованы события 95-го перцентиля ( $O_3_{95}$ ). Для событий каждого месяца на основе данных реанализа были получены композиты в нижней и средней тропосфере для температурного режима и особенностей циркуляции. Результаты показывают, что для событий  $O_3_{95}$  характерны схожие циркуляционные условия для каждого месяца. Циркуляция атмосферы характеризуется наличием области положительных аномалий геопотенциала между Западной и Восточной Сибирью, ассоциированная с теплыми воздушными массами; в зависимости от сезона она может быть смещена к востоку (зимний период) или западу (теплый период). С востока и запада от области с положительными аномалиями геопотенциала локализованы области отрицательных аномалий геопотенциала, ассоциированные с полярными воздушными массами. Район измерения  $O_3$  во все месяцы оказывается либо в центре, либо на западной периферии положительной аномалии геопотенциала. При этом в приземном слое тропосферы отмечаются положительные аномалии температуры воздуха, а также усиление ветра с юго-запада. Описанный циркуляционный режим представляет собой один из вариантов



экстремального развития меридиональных процессов и влияет на увеличение концентраций  $O_3$  за счет трансграничного переноса воздушных масс из юго-западных районов, усиления скорости фотохимических реакций, а также добавления дополнительного источника примесей из-за природных пожаров.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-05-50024, «Микромир» «Микрочастицы в атмосфере: образование и трансформация в приземном слое воздуха и свободной тропосфере, радиационные эффекты и влияние на здоровье населения». Измерение концентрации озона выполнено в рамках госзадания ИОА СО РАН.

### Список литературы

1. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
2. Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Постыляков О.В., Савкин Д.Е., Сенник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широтов В.В. Приземная концентрация озона на территории России в первом полугодии 2020 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2020. Т. 33, № 9. С. 710–721; Andreev V.V., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Elansky N.F., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kotel'nikov S.N., Kuznetsova I.N., Lapchenko V.A., Lezina E.A., Postilyakov O.V., Savkin D.E., Senik I.A., Stepanov E.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Chelibanov I.V., Chelibanov V.P., Shiroto V.V. Surface ozone concentration over Russian territory in the first half of 2020 // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 6. P. 671–681.
3. Heidorn K.C., Yap D. A synoptic climatology for surface ozone concentrations in Southern Ontario, 1976–1981 // Atmos. Environ. 1986. V. 20, N 4. P. 695–703.
4. Davies T.D., Kelly P.M., Low P.S., Pierce C.E. Surface ozone concentrations in Europe: Links with the regional-scale atmospheric circulation // J. Geophys. Res.: Atmos. 1992. V. 97, N D9. P. 9819–9832.
5. Pryor S.C., McKendry I.G., Steyn D.G. Synoptic-scale meteorological variability and surface ozone concentrations in Vancouver, British Columbia // J. Appl. Meteorol. 1995. V. 34, N 8. P. 1824–1833.
6. Lennartson G., Schwartz M. A synoptic climatology of surface-level ozone in Eastern Wisconsin, USA // Clim. Res. 1999. V. 13. P. 207–220.
7. Hegarty J., Mao H., Talbot R. Synoptic controls on summertime surface ozone in the northeastern United States // J. Geophys. Res. 2007. V. 112, N D14.
8. Demuzere M., Trigo R.M., Vila-Guerau de Arellano J., van Lipzig N.P.M. The impact of weather and atmospheric circulation on  $O_3$  and  $PM_{10}$  levels at a rural mid-latitude site // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9, N 8. P. 2695–2714.
9. Agel L., Lopez V., Barlow M., Colby F. Regional and Large-Scale Influences on Summer Ozone Levels in Southern California // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2011. V. 50, N 4. P. 800–805.
10. Vanos J.K., Cakmak S., Bristow C., Brion V., Tremblay N., Martin S.L., Sheridan S.S. Synoptic weather typing applied to air pollution mortality among the elderly in 10 Canadian cities // Environ. Res. 2013. V. 126. P. 66–75.
11. Zhang Y., Mao H., Ding A., Zhou D., Fu C. Impact of synoptic weather patterns on spatio-temporal variation in surface  $O_3$  levels in Hong Kong during 1999–2011 // Atmos. Environ. 2013. V. 73. P. 41–50.
12. Pope R.J., Butt E.W., Chipperfield M.P., Doherty R.M., Fenech S., Schmidt A., Arnold S.R., Savage N.H. The impact of synoptic weather on UK surface ozone and implications for premature mortality // Environ. Res. Lett. 2016. V. 11, N 12. P. 124004.
13. Giaccone E., Fratanni S., Cortesi N., González-Hidalgo J. Surface ozone concentration and its relation with weather types in NW Italy, 2003–2014 // Clim. Res. 2019. V. 77, N 1. P. 7–89.
14. Han H., Liu J., Shu L., Wang T., Yuan H. Local and synoptic meteorological influences on daily variability in summertime surface ozone in eastern China // Atmos. Chem. Phys. 2020. V. 20, N 1. P. 203–222.
15. Gouldsbrough L., Hossaini R., Eastoe E., Young P.J. A temperature dependent extreme value analysis of UK surface ozone, 1980–2019 // Atmos. Environ. 2022. V. 273. P. 118975.
16. Song A., Yan Y., Kong S., Ma J., Tong Z. Impact of synoptic climate system interaction on surface ozone in China during 1950–2014 // Atmos. Environ. 2022. V. 279. P. 119126.
17. Антохин П.Н. Исследование вертикального распределения озона в пограничном слое атмосферы: Автореф. дисс. Томск, 2015. 21 с.
18. Антохин П.Н., Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н. Сравнение различных методов статистического прогнозирования суточной динамики приземной концентрации озона // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 12. С. 1082–1089.
19. Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н. Зависимость образования озона в приземном слое от температуры воздуха // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 11. С. 971–979; Belan B.D., Savkin D.E., Tolmachev G.N. Air-temperature dependence of the ozone generation rate in the surface air layer // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 2. P. 187–196.
20. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н. Мезомасштабная изменчивость концентрации озона в приземном слое воздуха в Томском регионе (2010–2012 гг.) // Украин. Гідрометеорол. журн. 2013. № 12. С. 95–105.
21. Селегей Т.С., Филоненко Н.Н., Ленковская Т.Н. Зависимость концентраций приземного озона от адвективных факторов (на примере г. Новосибирска) // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1080–1086.
22. Antokhina O.Y., Antokhin P.N., Arshinov M.Y., Arshinova V.G., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Dudorova N.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Praslova O., Rasskazhikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Dynamic of the gas and aerosol composition in the atmospheric surface layer of Western Siberia during the summer polar intrusion // Proc. SPIE. V. 11208. P. 1120885-1.
23. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К.,

- Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Исследование состава воздуха в различных воздушных массах // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 9. С. 752–759; Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Dudorova N.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Study of air composition in different air masses // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 1. P. 72–79.
24. Antokhina O., Savkin D., Belan B., Tolmachev G. Dependence of the surface ozone concentration on the air temperature and conditions of atmospheric circulation in Western Siberia in the warm season (May–September) // Proc. SPIE. 2017. V. 10466. P. 104666H 1–11.
  25. Antokhina O.Y., Antokhin P.N., Arshinov M.Y., Belan B.D., Davydov D.K., Kozlov A.V., Savkin D.E., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Formation of gases and aerosol composition in background and urban areas of Western Siberia: A case study for the record-breaking hot April of 2020 // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 2020. V. 611, N 1. P. 012035.
  26. Overland J.E., Wang M. The 2020 Siberian heat wave // Int. J. Climatol. 2020. V. 41, N S1. P. E2341–E2346.
  27. Solberg S., Nov O., Survd A., Isaksen I.S.A., Coddeville P., De Backer H., Forster C., Orsolin Y., Uhse K. European surface ozone in the extreme summer 2003 // J. Geophys. Res. 2008. V. 13, N D7. P. D07307.
  28. Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б. и др. Газовые примеси в атмосфере над Москвой летом 2010 г. // Изв. РАН. Физика атмосф. и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 729–738.
  29. Звягинцев А.М., Блюм О.Б., Глазкова А.А., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Миллер Е.А., Миляев В.А., Попиков А.П., Скмунтикова Е.Г., Тарасова О.А., Шальгина И.Ю. Аномалии концентраций малых газовых составляющих в воздухе европейской части России и Украины летом 2010 г. // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 7. С. 582–588; Zvyagintsev A.M., Blum O.B., Glazkova A.A., Kotelnikov S.N., Kuznetsova I.N., Lapchenko V.A., Lezina E.A., Miller E.A., Milyaev V.A., Popikov A.P., Semutnikova E.G., Tarasova O.A., Shal'ygina I.Yu. Anomalies of trace gases in the air of the European part of Russia and Ukraine in summer 2010 // Atmos. Ocean. Opt. 2011. V. 24, N 6. P. 536–542.
  30. Sklyadneva T.K., Zhuravleva T.B., Davydov D.K., Kozlov A.V. Analysis of ground-based and satellite observations of atmospheric gas pollutants over Tomsk region under smoke mist conditions during summer 2012 // Proc. SPIE. 2016. V. 10035. P. 10035R.
  31. Pelly J.L., Hoskins B.J. A new perspective on blocking // J. Atmos. Sci. 2003. V. 60, N 3. P. 743–755.
  32. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara G. The ERA5 global reanalysis // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020. V. 146, N 530. P. 1999–2049.
  33. Гордов Е.П., Богомолов В.Ю., Генина Е.Ю., Шульгина Т.М. Анализ региональных климатических процессов Сибири: подход, данные и некоторые результаты // Вестн. Новосибир. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии. 2011. Т. 9, № 1. С. 56–66.
  34. Kharyutkina E., Loginov S., Martynova Y., Suda-kov I. Time series analysis of atmospheric precipitation characteristics in Western Siberia for 1979–2018 across different datasets // Atmosphere. 2022. V. 13, N 2. P. 189.
  35. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Зуев В.В., Зуев В.Е., Ковалевский В.К., Лиготский А.В., Мелешкин В.Е., Панченко М.В., Покровский Е.В., Рогов А.Н., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н. ТОР-станция мониторинга атмосферных параметров // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 8. С. 1085–1092.
  36. Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Ахлестин А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фазлиев А.З., Фофанов А.В. Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет ТОР-станции ИОА СО РАН // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 10. С. 845–853; Davydov D.K., Belan B.D., Antokhin P.N., Antonovich V.V., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Akhlestin A.Yu., Belan S.B., Dudorova N.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fazliev A.Z., Fofonov A.V. Monitoring of atmospheric parameters: 25 years of the Tropospheric Ozone Research Station of the Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 2. P. 80–192.
  37. Wirth V., Riemer M., Chang E.K.M., Martius O. Rossby wave packets on the midlatitude waveguide – a review // Mon. Weather Rev. 2018. V. 146, N 7. P. 1965–2001.
  38. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Девятова Е.В., Мордвинов В.И. Динамические процессы в атмосфере, обуславливающие аномалии осадков в Восточной Сибири и Монголии в летний период // Фундам. и прикл. климатол. 2018. № 1. С. 10–27.
  39. Thorp T., Arnold S.R., Pope R.J., Spracklen D.V., Conibear L., Knote C., Arshinov M., Belan B., Asmi E., Laurila T., Skorokhod A.I., Nieminen T., Petäjä T. Late-spring and summertime tropospheric ozone and NO<sub>2</sub> in western Siberia and the Russian Arctic: Regional model evaluation and sensitivities // Atmos. Chem. Phys. 2021. V. 21, N 6. P. 4677–4697.
  40. Моисеенко К.Б., Штабкин Ю.А., Березина Е.В., Скороход А.И. Региональные фотохимические источники приземного озона в Европе и Западной Сибири // Изв. РАН. Физика атмосф. и океана. 2018. Т. 54, № 6. С. 645–658.
  41. Moiseenko K.B., Vasileva A.V., Skorokhod A.I., Belykh I.B., Repin A.Yu., Shtabkin Yu.A. Regional impact of ozone precursor emissions on NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub> levels at ZOTTO tall tower in Central Siberia // Earth Space Sci. 2021. V. 8, N 7.
  42. Obolkin V., Potemkin V., Khuriganova O., Khodzhher T. Ozone monitoring in the Baikal region (East Siberia): Spatiotemporal variability under the influence of air pollutants and site conditions // Atmosphere. 2022. V. 13, N 4. P. 519.

43. *Shtabkin Y.A., Moiseenko K.B., Skorokhod A.I., Berezina E.V., Vasileva A.V.* Sources and variations of tropospheric ozone in central Siberia: Observations and model simulations // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 2020. V. 606, N 1. P. 012058.

44. *Schierhorn F., Kastner T., Kummerle T., Meifroidt P., Kurganova I., Prishchepov A.V., Erb K.-H., Houghton R.A., Müller D.* Large greenhouse gas savings due to changes in the post-Soviet food systems // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14, N 6. P. 065009.

*O.Yu. Antokhina, P.N. Antokhin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, D.K. Davydov, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, T.M. Rasskazchikova, D.E. Savkin, D.V. Simonenkov, T.K. Sklyadneva, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov.* **The large-scale atmospheric circulation pattern over Asia associated with formation of extremely high surface ozone concentrations in the region of Tomsk (Western Siberia).**

Based on ERA 5 reanalysis data and average daily surface ozone concentrations ( $O_3$ ) measured at the TOR station from 1993 to 2020, the circulation mode, which contributes to the formation of extremely high ozone concentrations (95th percentile, further  $O_395$ ), is studied. It is found that for all months; an identical circulation mode is distinguished, characterized by an increase in surface air temperature in the area, which includes the TOR station. In addition to the increase in air temperature,  $O_395$  events are characterized by an increase in the southwestern component of wind speed. It was also found that these circulation features are associated with the development of meridionality, probably due to the propagation of waves in midlatitudes. The revealed circulation mode simultaneously contributes to the transboundary transfer of ozone and its precursors from the southern regions, the enhancement of ozone photochemistry, and the emergence of an additional source of ozone precursors – wildfires.

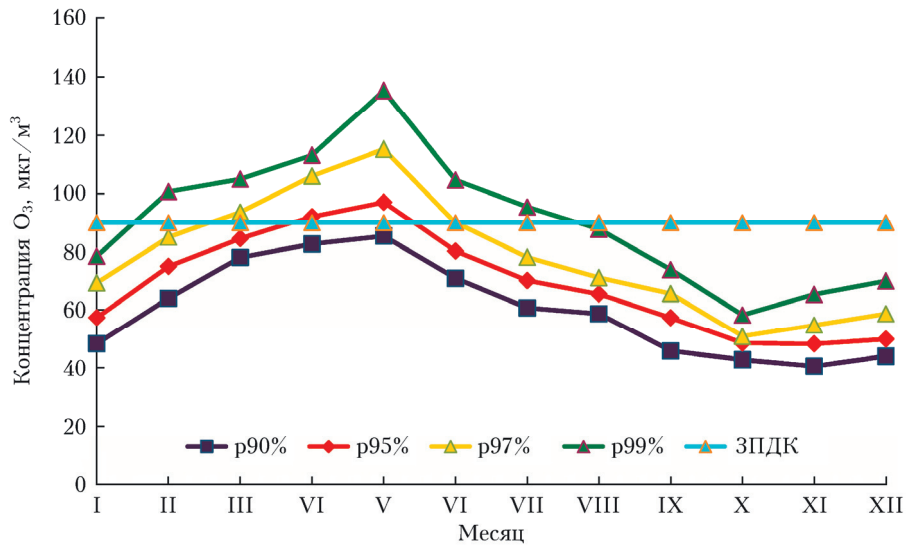


Рис. 1. Годовой ход среднесуточной концентрации озона, соответствующей от 90-го до 99-го проценталя

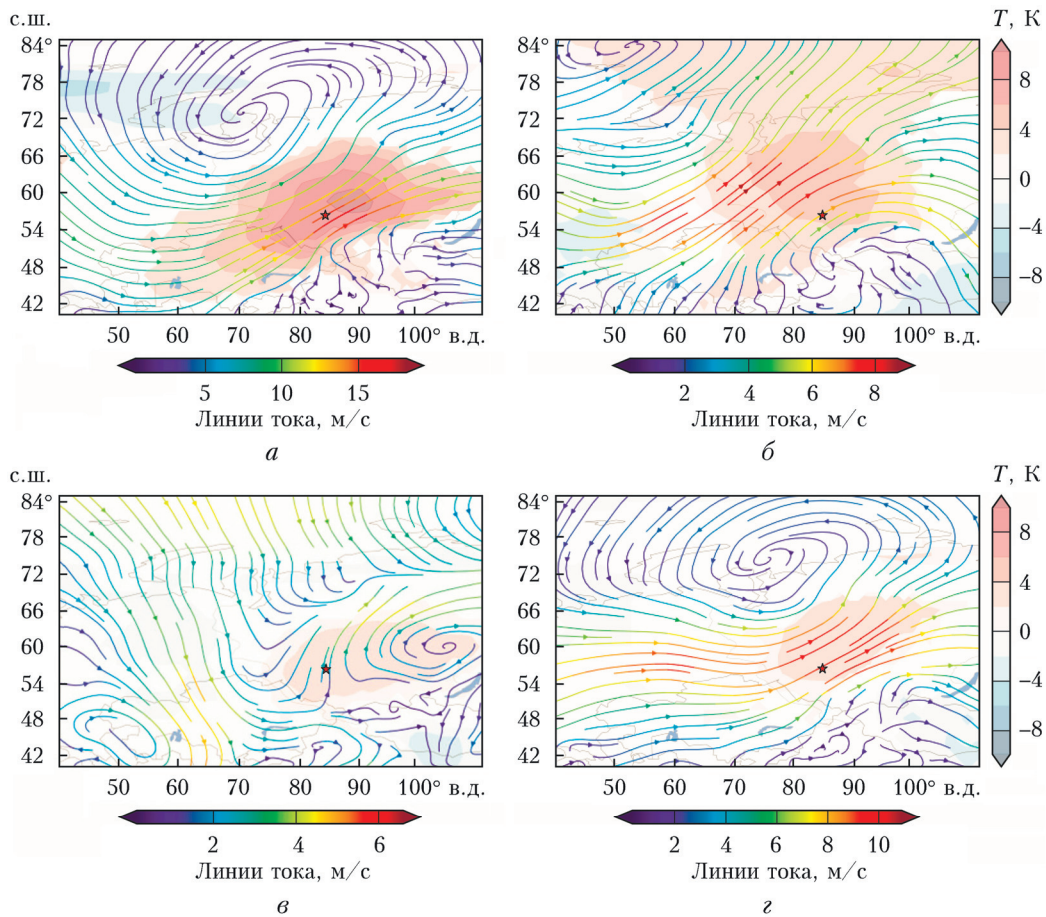


Рис. 2. Композиты для приземной температуры воздуха и линий тока поля скорости ветра на уровне 850 гПа (м/с): *a* – январь; *б* – апрель; *в* – июль; *г* – октябрь; звездочкой отмечена TOR-станция



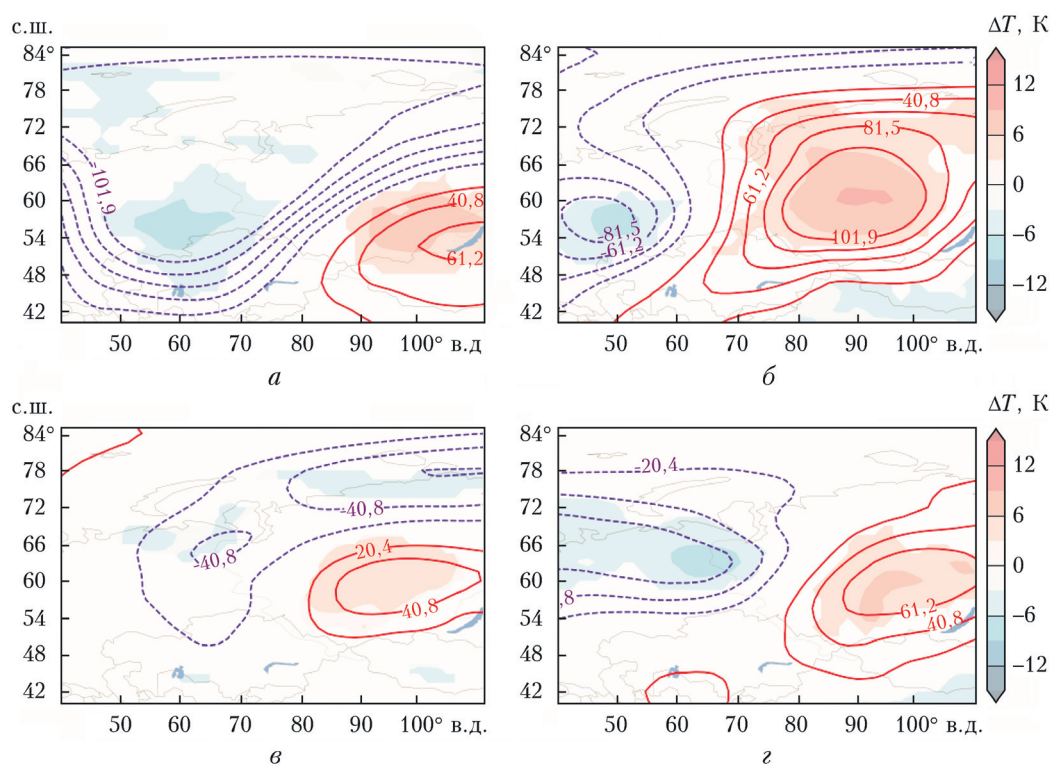


Рис. 3. Композиты для геопотенциала 500 гПа и потенциальной температуры на динамической тропопаузе: *а* – январь; *б* – апрель; *в* – июль; *з* – октябрь

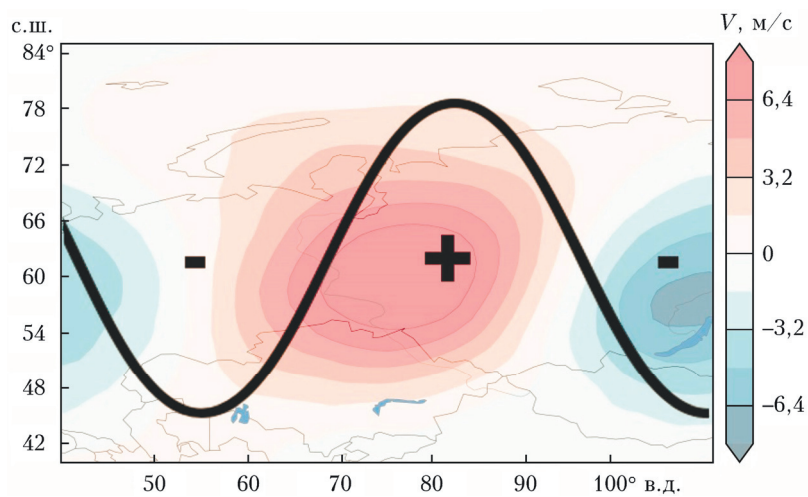


Рис. 4. Усредненный композит для меридиональной компоненты поля скорости ветра ( $V$ ) на уровне 250 гПа. Схематично показаны области климатических гребней и ложбин, соответствующих O<sub>3</sub>95