



УДК 551.583

Современные особенности распределения озона в Иркутске

И. В. Латышева (aerosol@lin.irk.ru)

К. А. Лощенко (christ.1526@mail.ru)

Е. В. Миллер (elenaml@mail.ru)

Аннотация. Статья посвящена проблеме атмосферного озона. В работе рассматриваются современные особенности распределения озона в Иркутске и влияние на концентрации озона метеорологических параметров.

Ключевые слова: климат, атмосферная циркуляция, метеорологические параметры, газовые примеси, озон.

Введение

Озон (O_3) является важным парниковым газом, вклад которого в суммарный парниковый эффект оценивается в несколько процентов. Содержание озона в воздухе невелико и в то же время очень изменчиво. Его распределение в пространстве и во времени определяется химическими, радиационными и динамическими процессами. Наибольшее значение для физических процессов атмосферы имеют оптические свойства озона, которые заключаются в поглощении и рассеянии солнечной радиации в ультрафиолетовом диапазоне [20].

Наиболее полно в работах российских и зарубежных авторов отражены эмпирические данные по общему содержанию озона (ОСО). В работе [19] представлены результаты измерений общего содержания озона на территории России за период 1973–2002 гг., осредненные по пяти основным регионам от севера европейской территории России до Дальнего Востока. Рассмотрены сезонные изменения ОСО за весь период и два полупериода (1973–1987 гг. и 1988–2002 гг.), оценены статистические параметры массивов данных и статистическая значимость различий средних месячных значений ОСО для этих полупериодов и регионов. Показано, что выявленные различия значимы на уровне 95–99 % в зимне-весенние месяцы и незначимы летом. Предлагается использовать накопленные многолетние данные по ОСО как климатические нормы для оценки прошлых, настоящих и будущих изменений озоносферы.

А. М. Звягинцевым по данным 60 станций, расположенных на территории Европы, количественно описана сезонная периодичность отношения смеси озона, определены даты сезонных экстремумов [9]. Показано, что в ряде случаев наблюдаются два максимума, имеющие разную природу. Ве-

сенный максимум связан с естественным источником озона и обусловлен интенсификацией в этот период вертикального перемешивания между приземным слоем и свободной атмосферой. Летний максимум отношения смеси озона выражен заметно не на всех станциях и обусловлен, по-видимому, фотохимическим образованием озона, происходящим под влиянием антропогенного загрязнения атмосферы. Выявлены различия в суточном изменении отношения смеси озона в разные сезоны года. Показаны значительные различия в изменении содержания озона на равнинных и высокогорных станциях, в уровнях содержания озона в выходные и будние дни.

В работе [2] рассматриваются суточные вариации концентрации озона в приземном слое воздуха по данным 10-летнего ежечасного мониторинга. Показано, что они определяются двумя факторами: поступлением в воздух озонобразующего вещества и притоком суммарной солнечной радиации. На действие этих факторов оказывает влияние температура воздуха и сезонная динамика растительности. В осенне-зимний сезон в суточном ходе озона появляется второй максимум – ночной, который, по-видимому, обусловлен оседанием воздуха, но не из стратосферы, а из пограничного слоя.

Кратко остановимся на работах, посвященных исследованию влияния внутренних и внешних факторов на изменение общего содержания озона (ОСО). Наиболее активно исследованиями в этом направлении в России занимается Е. А. Жадин [7, 8]. В частности, им предложен довольно простой эмпирический метод оценки относительного влияния естественных и антропогенных факторов на озоновый слой. Этот метод основан на обнаруженной ранее корреляции межгодовых аномалий общего содержания озона с изменениями стратосферного момента импульса. Сравнение восстановленных и реальных значений аномалий содержания озона показало их хорошее соответствие в глобальном масштабе, включая развитие антарктической озоновой дыры в 1979–1991 гг. Относительный вклад антропогенных факторов в зонально осредненные тренды ОСО не превышал ~50 % в 1979–1991 гг. с максимумами их воздействия в средних широтах Северного полушария (март–август) и в высоких широтах Южного полушария (август).

В работе [8] исследованы связи межгодовых вариаций общего содержания озона и приземной температуры Северного полушария с использованием средних месячных спутниковых данных TOMS и Реанализа NCEP/NCAR за январь–март 1979–1994 гг. Показано, что на межгодовых временных масштабах уменьшение (увеличение) содержания озона происходит приблизительно в тех же географических районах, где наблюдается повышение (понижение) температур в зимний период. Обнаружены устойчивые противофазные нелокальные корреляции (коэффициент $\sim -0,75$) межгодовых вариаций содержания озона над Англией в январе и приземной температуры в феврале в Западной Сибири, южной части Европейской России и в районе Азорских островов. Эти результаты в дальнейшем могут быть использованы для прогноза аномально холодных зим на территории России с заблаговременностью 30–40 дней. Обсуждаются возможные ме-

ханизмы нелокальных связей содержания озона и приземной температуры и влияния на них арктического колебания (АК).

В работе [12] приводятся результаты анализа данных высокоточных наблюдений общего содержания озона и баллонного озонового зондирования на станциях Салехард и Якутск, полученных в зимне-весенний период 2000 г. Дается краткое описание метеорологической ситуации в стратосфере в этот период. Наблюдаемый дефицит общего содержания озона в феврале–марте 2000 г. для этих станций составлял от 10 до 15 % климатической нормы. Это самый большой дефицит озона, который наблюдался за время проведения баллонного зондирования в Сибири с 1995 г. Приводятся оценки скорости химического разрушения озона в стратосферном циклоне для уровня потенциальной температуры 475 К (18–19 км), которые в феврале – марте 2000 г. достигали ~1 % в сутки.

Влияние циркуляционных факторов на содержание озона было исследовано Т. А. Егоровой, Е. В. Розановым, И. Л. Кароль и др. [17]. С помощью трехмерной глобальной транспортно-фотохимической модели, использующей данные ассимиляционной системы Метеорологической службы Великобритании о состоянии атмосферы, в 1990-х гг. выявлено заметное влияние вариаций атмосферной циркуляции на общее содержание озона в Северном полушарии. Полученные оценки показали, что хлорфторуглеводороды (ХФУ) не играют определяющей роли в наблюдаемой межгодовой изменчивости озона.

В. И. Васильевым и С. П. Перовым проведены исследования пространственно-временных вариаций общего содержания озона (ОСО) в тропической зоне в периоды, предшествующие зарождению и существованию мощных тропических циклонов [3, 4]. Обнаружена статистическая связь между образованием локальных максимумов во временном ходе ОСО и частотой появления тропических циклонов. Первый максимум ОСО появляется за 4–8 суток, второй за 1–3 суток. Даются рекомендации по выявлению характерных особенностей во временных рядах содержания озона и характеристик его тренда с целью улучшения прогноза образования тропических циклонов.

В работе [16] проведен синоптический анализ средних месячных и средних суточных полей общего содержания озона по измерениям сети наземных станций Росгидромета и по данным измерений со спутника аппаратурой TOMS. Обнаружено, что значительные межгодовые изменения характера эволюции циркумполярного вихря и стратосферного северотихоокеанского антициклона оказывают влияние на формирование и динамику поля озона в зимне-весенний период в стратосфере высоких широт Северного полушария. Направление зонального переноса воздушных масс с повышенным содержанием озона (преимущественно из области низких широт) изменяется в зависимости от температуры полярной зимней стратосферы и фазы известного квазидвухлетнего цикла (КДЦ) в рассматриваемый период. В годы с восточной фазой КДЦ и «теплой» полярной стратосферой воздушные массы с повышенным содержанием озона в конце

зимы перемещаются на северо-восток Канады и Атлантики, а в годы с западной фазой КДЦ и «холодной» полярной стратосферой – на север Евразии.

В г. Кисловодске и его окрестностях на основе данных экспедиционных измерений в апреле–мае 2000 г. с помощью дистанционного профиломера МТП-5 подтвержден вывод о решающей роли инверсионных слоев в формировании ночного минимума концентрации приземного озона в предгорной местности с котловинообразным рельефом [11]. Обнаружено влияние ветрового режима на содержание озона в приземном слое атмосферы. Экспедиционные наблюдения показали, что изменчивость концентрации озона в приземном слое атмосферы в этом районе аналогична ее изменчивости в свободной атмосфере и что существуют два основных механизма, регулирующих содержание озона, это адвективный перенос и вертикальный перенос озона из верхних слоев атмосферы.

М. А. Локощенко и Д. М. Шифриным по данным одновременного аэростатного и акустического зондирования нижней тропосферы (в слое до 800 м), проведенного в Великих Луках в мае–июне 2002 г. совместными силами Московского государственного университета и Центральной аэрологической обсерватории, рассмотрено влияние температурной стратификации, а также некоторых явлений погоды на распределение озона с высотой [14]. При неустойчивой стратификации его парциальное давление почти неизменно в пределах всей нижней тропосферы. В условиях приземной инверсии наблюдается уменьшение содержания озона вблизи поверхности земли. При приподнятой инверсии парциальное давление озона практически одинаково как под инверсией, так и над ней, в слое самой инверсии оно скачкообразно возрастает с высотой. Синоптические условия существенно влияют на режим стратификации: в условиях арктической воздушной массы термическая конвекция отмечается чаще, а приземные инверсии реже, чем при господстве местной воздушной массы. Искусственное динамическое перемешивание может приводить к разрушению приземной инверсии в течение нескольких минут.

Влияние антропогенных факторов в изменении общего содержания озона исследовалось в приземном слое атмосферы г. Улан-Удэ [22]. Приведены результаты непрерывных синхронных измерений концентраций озона, оксида и диоксида азота, а также окиси углерода в г. Улан-Удэ в летний период 2000 г. Обнаружены большие концентрации озона и окислов азота в приземном слое атмосферы. Показано, что вблизи автомагистралей изменение средней суточной концентрации озона в период застоя воздуха описывается функцией, близкой к периодической. Обнаружена значимая статистическая связь средних дневных концентраций озона и температуры воздуха.

Влияние внешних факторов на изменение озона было рассмотрено В. К. Ролдугиным по данным TOMS в высокоширотной точке для 19 протонных событий, а также для 21 случая эффекта Форбуша – уменьшения интенсивности галактических космических лучей. Статистически значимых изменений ОСО, связанных с этими явлениями, не обнаружено [21].

В работе [24] представлен совместный анализ внешних и циркуляционных факторов, существенных для формирования поля среднего месячного общего содержания озона (ОСО) и переноса озона над территорией России по данным 30 станций наземной озонметрической сети, осредненным за год, декабрь-март и июнь-август по пяти климатическим регионам. На основе спектрального анализа получены количественные оценки воздействия арктического колебания (АК), отклонения зимней температуры полярной нижней стратосферы, квазидвухлетнего колебания (КДК), 11-летнего солнечного цикла, Эль-Ниньо – южного колебания (ЭНЮК) на ОСО и выявлены региональные различия в действиях данных факторов. В декабре-марте в годы с отрицательной фазой арктического колебания, теплой стратосферой, восточной фазой КДК содержание озона значительно увеличивается относительно противоположных фаз колебаний в среднем на 35, 28 и 26 е. Д. соответственно. Спектры, как и дискриминантная функция, показывают сильное влияние 11-летнего цикла и КДК на общее содержание озона даже в летние месяцы, при этом квазидвухлетние колебания проявляются сильнее на востоке России. Выделить эффект ЭНЮК на общем «шумном» фоне холодного полугодия, когда начинают действовать многие атмосферные процессы, не удалось. Однако в летние месяцы в теплые периоды ЭНЮК общее содержание озона на уровне 97%-й значимости увеличивается над большей частью территории России. Остальные полученные результаты значимы на уровне 95–99,9 %.

В. Н. Маричевым, И. Л. Галкиной и Г. М. Крученицким [15] на основе анализа данных лидарного зондирования озона и температуры в стратосфере над Томском в период январь-март 1996-2000 гг. изучено влияние глобальных геофизических процессов на их вертикальное распределение. С точки зрения статистической значимости вносимого вклада в формирование вертикального распределения озона и температуры проанализировано 18 глобальных геофизических процессов, включая квазидвухлетние колебания, солнечную активность, температуру поверхности акваторий Мирового океана, арктического, антарктического, тихоокеанского и других субглобальных колебаний и пр. Определен количественный вклад каждого из процессов в формирование вертикального распределения концентрации озона и температуры в нижней стратосфере. Показана пригодность данных лидарного мониторинга нижней стратосферы для обнаружения и диагностики долговременных изменений ее состояния.

Наиболее перспективны результаты численного моделирования общего содержания озона. В. Я. Галиным, Е. М. Володиным и С. П. Смышляевым представлен опыт включения динамики и химии озона в атмосферную модель ИВМ РАН [6]. Для уменьшения систематических ошибок в воспроизведении сезонного цикла распределения озона были изменены форма дифференциальных уравнений и конечно-разностная схема в блоке динамики. Показано влияние орографического гравитационно-волнового сопротивления на распределение озона.

В. Я. Галин, П. А. Зименко и А. П. Кудрявцев [5] предлагают использовать двумерную фотохимическую модель с динамическими параметрами из модели общей циркуляции атмосферы для изучения реакции содержания озона на обусловленные солнечной активностью изменения внеатмосферных потоков солнечной радиации. Модельные эксперименты по изучению влияния изменений потоков солнечной радиации в разных участках спектра на содержание озона показали, что максимальный положительный эффект достигается при увеличении солнечной радиации в диапазоне длин волн 200–225 нм, а отрицательный – в диапазоне 300–325 нм, где увеличение потоков солнечной радиации вызывало уменьшение содержания озона в глобальном масштабе. Изменение потоков ультрафиолетовой радиации от минимума к максимуму солнечной активности показало положительную реакцию содержания озона, хотя в нижней части озоносферы скорости образования и разрушения озона одновременно уменьшились.

Для прогнозирования содержания озона важно иметь представление о трендах и цикличности его изменения в различных регионах. За период наблюдений за озоном на ст. Иссык-Куль среднее годовое содержание озона в атмосфере упало примерно на 7 % (24 е. Д.) со средней скоростью – $(0,34 \pm 0,03)$ % в год [20].

При общей тенденции к понижению во временном ходе общего содержания озона в центре Евразии зарегистрировано его устойчивое понижение с 1979 г. до конца 1984 г., существенное замедление скорости уменьшения в 1985–1992 гг. и рост общего содержания озона с 1994 г. по 1998 г.

В работе [1] рассмотрены межгодовые изменения средних месячных и средних годовых значений общего содержания озона (ОСО) за 1973–2002 гг. по измерениям сети наземных станций Росгидромета, осредненных по пяти регионам России. Выделены группы с повышенным средним годовым и средним ОСО за декабрь–март с «теплой» нижней стратосферой Арктики зимой и с малым ОСО с «холодной» стратосферой. Оценена статистическая значимость различия средних годовых и средних за зиму ОСО для этих групп лет, а также связь значений ОСО этих групп с известными квазидвухлетними колебаниями экваториального зонального переноса, с арктическим и североатлантическим колебаниями. Эти связи могут быть использованы для оценки ожидаемых межгодовых отклонений средних значений ОСО по регионам и сезонам.

Основные колебания, проявившиеся в вариациях ОСО, имеют периоды: 6, 12, 21, 27, 44 и 102 мес. Сезонными вариациями объясняются 6- и 12-месячные гармоники, 21–27-месячные гармоники связывают с квазидвухлетними колебаниями скорости и направления стратосферного ветра над тропическими широтами, а 44-месячные – с явлениями Эль-Ниньо. Колебания с 102-месячным периодом связывают, прежде всего, с 11-летним циклом солнечной активности. Кроме того, возможно, что это колебание вызвано извержениями вулканов.

В работе [10] определены характеристики периодической изменчивости приземной концентрации озона на 98 равнинных станциях Западной и Центральной Европы за период не менее 7 (до 14) лет. В энергетическом спектре сезонной изменчивости средней суточной концентрации озона на большинстве станций доминирует 12-месячная гармоника, максимум которой наблюдается в весенний период (в Северной Европе он наблюдается на 1–2 месяца раньше, чем в Южной Европе). 6- и 4-месячные гармоники наиболее выражены на станциях, расположенных вблизи побережий морей и океанов. Высшие гармоники в значительной степени влияют на срок наступления экстремумов озона, сдвигая его ближе к лету или даже образуя второй (летний) максимум, который на ряде станций (в Италии, Венгрии, на юге ФРГ и др.) по величине превышает весенний. В энергетическом спектре суточной изменчивости озона доминирует 24-часовая гармоника.

К числу региональных работ, проводимых на территории Иркутской области, можно отнести исследования А. В. Михалева, М. А. Черниговской и др. [23], где производится сопоставление данных спектральных измерений околополуденного ультрафиолетового (УФ) излучения в Восточной Сибири (г. Иркутск) за 1997–1998 гг. с вариациями общего содержания озона (ОСО). Выявлено увеличение сезонной нормы УФ излучения весной 1997 г. над Восточной Сибирью в период аномалии озона. Выделены колебания интенсивности УФ излучения с периодами 6–10, 25 дней.

Объекты и методы исследования

Известно, что интенсивные атмосферные вихри тропических и умеренных широт (тропические и внетропические циклоны), являясь важнейшим элементом циркуляционной системы атмосферы, оказывают существенное влияние на пространственно-временное распределение полей метеорологических величин и малых газовых составляющих атмосферы, прежде всего озона, что обусловлено его влиянием на климатический режим атмосферы [18].

Идея о тесной связи характеристик атмосферного озона с динамическими процессами в атмосфере и возможности использования наблюдений за озоном как индикатором атмосферных процессов была высказана Добсоном еще в конце двадцатых годов XX в. С тех пор многочисленные исследования особенностей пространственно-временных вариаций характеристик атмосферного озона подтвердили правильность этой гипотезы [25].

Установлено, что на высотах, меньших 200 гПа, основной вклад (47–72 %) в общую изменчивость концентрации озона вносят мезомасштабные и крупномасштабные синоптические процессы. Диапазон пространственных масштабов этих процессов достаточно широк: от 10 до $3 \cdot 10^3$ км, а временных – от нескольких часов до недели.

Различия в содержании озона заметны в зоне атмосферных фронтов, разделяющих разнородные по температурным и влажностным свойствам воздушные массы. Изучение длинных волн выявило, что в ложбине волны обычно существует избыток озона с левой стороны течения, т.е. там, где

преобладают нисходящие движения, а в гребне волны – наоборот, преобладают восходящие движения и, следовательно, недостаток озона.

Наиболее ярко влияние бароклинности на содержание озона проявляется в струйных течениях. Впервые их влияние на ОСО обнаружил Г. П. Гущин [18]. Он показал, что по левую сторону от оси струйного течения содержание озона больше, чем по правую (в Северном полушарии) и что существует большой горизонтальный градиент озона, направленный поперек оси струйного течения.

Возмущающее влияние внетропических циклонов на озоновый слой таково, что в области, занятой циклоном, в целом преобладают положительные аномалии озона. Средние значения аномалий весьма велики и составляют около 10–15 е. Д. Поэтому возрастание числа циклонов, проходящих над определенным регионом в умеренных широтах, должно приводить к росту положительных аномалий ОСО в этом регионе. И наоборот, уменьшение числа циклонов ведет к уменьшению числа положительных аномалий ОСО.

Наиболее вероятной физической причиной повышения ОСО в области внетропических циклонов является тропосферно-стратосферный обмен, имеющий место в хорошо развитых циклонических вихрях, которые распространяются по высоте на всю тропосферу. При этом стратосферный воздух опускается в тропосферу по каналу, имеющему значительные поперечные размеры: до 800 км по ширине и 1,5 км по толщине [18].

Таким образом, динамические процессы в атмосфере являются важнейшим фактором, определяющим пространственно-временное распределение атмосферного озона. Среди них наибольшей изменчивостью обладает вихревая (циклоническая и антициклоническая) активность.

В работе представлено исследование внутригодовой динамики общего содержания озона, полученное по данным ежедневных наблюдений за озоном на метеорологической станции Иркутск за период 2005–2009 гг.

Впервые для исследуемого региона описаны синоптические условия формирования аномально высоких и аномально низких значений общего содержания озона, которые оценивались по превышениям среднесуточных концентраций общего содержания озона значений сигма ($\geq 2\delta$). По материалам ежедневных синоптических карт рассматривались атмосферные процессы у поверхности земли, в средней (АТ-700 гПа и АТ-500 гПа) и верхней (АТ-300 гПа) тропосфере. Для исследования механизма переноса озона проведен сравнительный анализ численных значений метеорологических величин на разных уровнях тропосферы в дни с повышенными и пониженными концентрациями озона в Иркутске.

Для определения наличия связи межгодовой изменчивости ОСО с изменчивостью вихревой активности были рассчитаны средние значения ОСО в Иркутске в различные периоды последней циркуляционной эпохи по типизации, предложенной Б. Л. Дзердзеевским и продолжаемой по настоящее время Н. К. Кононовой и И. В. Мальневой [13].

Обсуждение полученных результатов

В распределении общего содержания озона (ОСО) в Иркутске отчетливо прослеживается максимум в феврале (421 е. Д.), который обусловлен интенсификацией в этот период вертикального перемешивания между приземным слоем и свободной атмосферой (рис.1). Основным минимумом (306–301 е. Д.) ОСО в Иркутске отмечается в сентябре–октябре. В годовом распределении наиболее изменчиво ОСО в феврале-марте (СКО = 36–37 е. Д.), наименее изменчиво ОСО в июле-августе (СКО = 14–15 е. Д.).

Амплитуда внутригодового распределения ОСО в Иркутске в исследуемый период (2005–2009 гг.) составила в среднем 123 е. Д., достигая максимальных значений (158 е. Д.) в 2005 г., минимальных значений (94 е. Д.) в 2008 г.

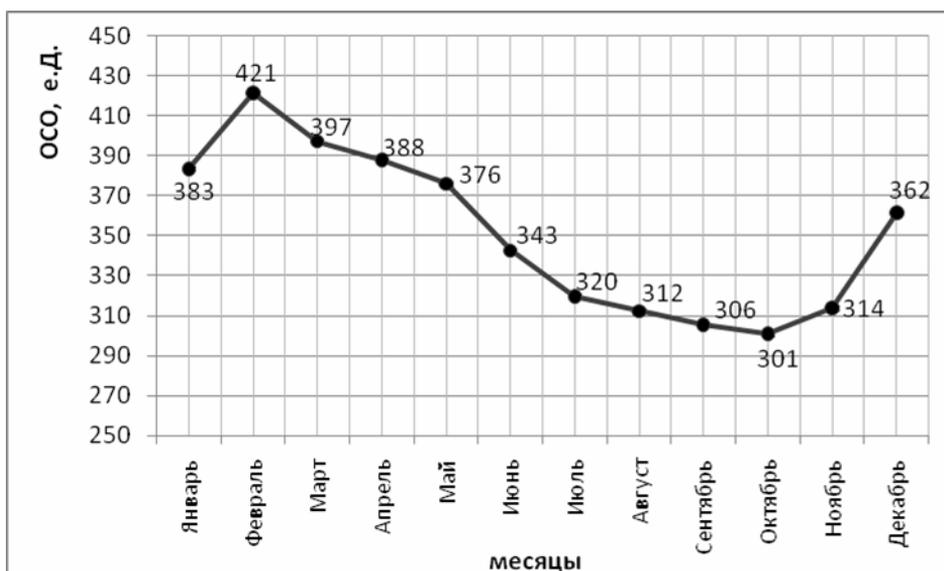


Рис. 1. Внутригодовое распределение средних многолетних значений общего содержания озона (е. Д.) в Иркутске в 2005–2009 гг.

Начиная с 1981 г. по настоящее время (период увеличения продолжительности меридиональных южных и северных процессов в Северном полушарии [13]) в Иркутске отмечено уменьшение общего содержания озона по сравнению с 1970–1980 гг. (период повышенной продолжительности зональных процессов в Северном полушарии). Среднее годовое содержание озона в Иркутске уменьшилось от 390 до 361 е. Д. (табл.1).

Следует отметить, что уменьшение средних годовых значений ОСО в Иркутске происходит на фоне повышения средних годовых температур воздуха, т. е. на фоне потепления, что согласуется с выводами, полученными ранее другими исследователями [7; 8]. Наиболее быстро ОСО уменьшается весной.

Таблица 1

Средние многолетние значения температуры воздуха (°С) и ОСО (е. Д.) в Иркутске в различные периоды современной циркуляционной эпохи [13]

Годы	Месяцы												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Температура воздуха, °С													
1970–1980	-19,1	-17,2	-8,6	1,3	8,6	15,8	17,5	14,9	8,9	0,5	-7,8	-16,5	-0,1
1981–1998	-17,5	-14,3	-6,3	2,4	10,0	14,6	17,8	15,8	8,7	1,8	-8,1	-14,5	0,9
1999–2008	-18,1	-13,8	-6,2	2,7	10,8	16,9	19,0	16,0	10,0	1,7	-7,6	-15,9	1,3
ОСО, е. Д.													
1970–1980	415	451	471	462	429	378	350	340	339	341	345	360	390
1981–1998	383	405	421	407	400	362	335	322	318	312	325	342	361
1999–2008	403	405	419	402	386	346	335	320	316	313	327	362	361

В период с 2005 по 2009 гг. общее содержание озона в Иркутске в среднем в 53–54 случаях за год превышало величины сигма (σ). При этом число крупных ($\geq 2\sigma$) положительных аномалий отмечалось примерно вдвое чаще, чем число крупных отрицательных аномалий ОСО (табл.2).

Таблица 2

Количество случаев превышения общего содержания озона ($\Delta\text{ОСО}_i$) значений сигма (σ) в Иркутске в 2005–2009 гг.

Отклонения ($\Delta\text{ОСО}_i$)	Годы				
	2005	2006	2007	2008	2009
$\Delta\text{ОСО}_i \geq \sigma$					
Отрицательные	54	65	52	46	51
Положительные	50	58	54	52	53
$\Delta\text{ОСО}_i \geq 2\sigma$					
Отрицательные	4	5	5	4	2
Положительные	11	7	11	10	7

Вероятность аномального распределения общего содержания озона в Иркутске примерно одинакова во все месяцы года (рис. 2). В среднем за месяц отмечается около 3–5 случаев как аномально высоких (max), так и аномально низких (min) концентраций озона в Иркутске. По суммарному количеству случаев с аномалиями ОСО выделяются весенние месяцы с максимумом в мае.

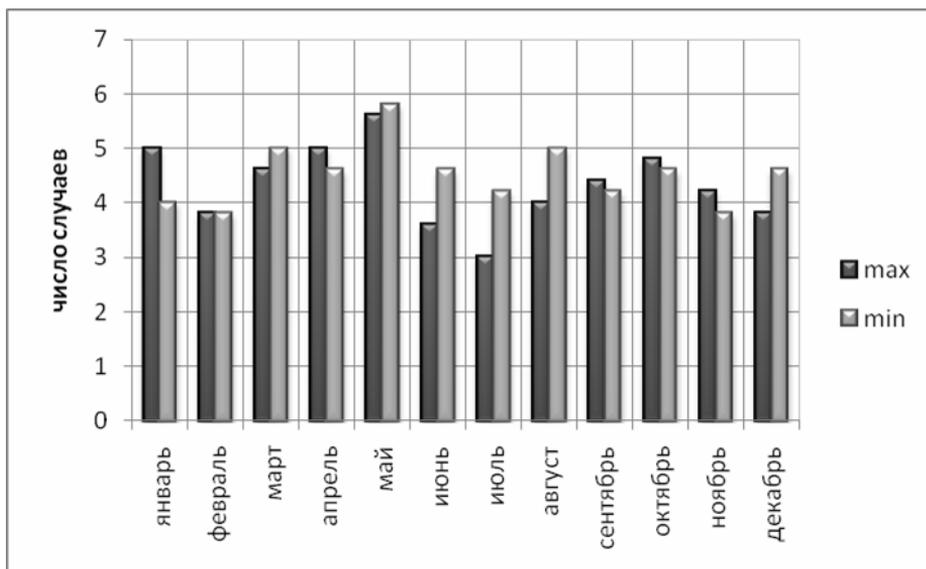


Рис. 2. Внутригодовое распределение среднего многолетнего количества случаев превышения ОСО значений сигма ($\Delta\text{ОСО}_i > \sigma$) в Иркутске в 2005–2009 гг.

Крупные положительные аномалии ОСО (max) в Иркутске отмечались на фоне пониженных значений температур и суммарных дефицитов влаги в нижнем 5-километровом слое тропосферы, повышения атмосферного давления и усиления антициклонального вихря ($\nabla P < 0$) по сравнению со средними значениями метеорологических величин, которые наблюдались при формировании крупных отрицательных аномалий ОСО (min) в Иркутске (табл. 3).

Таблица 3

Средние многолетние значения метеорологических величин на разных уровнях тропосферы при формировании аномально высоких (max) и аномально низких (min) значений ОСО в Иркутске в холодный (X–III) и теплый (IV–IX) период 2005–2009 гг.

Период	ОСО	Метеорологические параметры					
		Температура, °C			Суммарный дефицит влаги в 5-километровом слое, °C	Барическое поле	
		земля	1,5 км	5 км		P, гПа	∇P , гПа
X–III	min	-9,8	-5,4	-26,8	22,1	1021	-7,0
	max	-22,4	-19,1	-40,8	12,5	1030	-11,3
IV–IX	min	13,5	11,6	-16,1	20,9	1012	1,8
	max	6,3	2,3	-21,6	11,4	1015	-8,5

В периоды формирования экстремальных значений ОСО в Иркутске существенно различался характер вертикальных движений на разных уровнях тропосферы (рис. 3). Аномально высокие концентрации озона (max) отмечались в основном при усилении нисходящих токов в атмосфере, особенно на уровне АТ-500 гПа (5 км), где их значения в среднем в 3–6 раз больше по сравнению с периодами формирования аномально низких (min) концентраций озона в Иркутске.

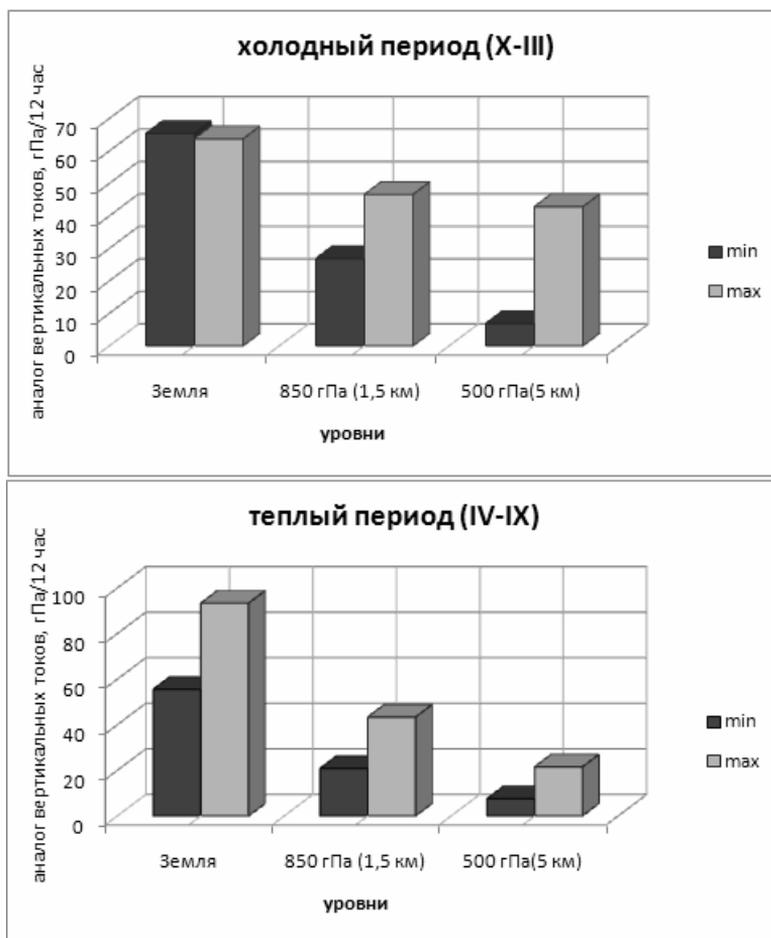


Рис. 3. Средние многолетние значения аналога вертикальных токов (гПа/12 ч) на разных уровнях тропосферы при аномально высоких (max) и аномально низких (min) значениях ОСО в Иркутске в 2005–2009 гг.

Характеристики приземных инверсий температур не имеют четко выраженных закономерностей в периоды экстремумов ОСО в Иркутске (табл. 4). Более выражено понижение уровня тропопаузы при формировании экстремально высоких значений ОСО как в теплый (IV–IX), так и в холодный (X–III) период года.

Таблица 4

Средние многолетние значения параметров атмосферы в периоды формирования anomalно высоких (max) и anomalно низких (min) значений ОСО в Иркутске в 2005–2009 гг.

Период	ОСО	Характеристики приземных инверсий температуры		Высота тропопаузы, м
		мощность, м	интенсивность, °С	
X–III	min	1029	6,6	10 555
	max	906	5,4	8194
IV–IX	min	787	2,8	11 735
	max	926	2,4	9965

Аномально высокие значения ОСО в Иркутске в 60 % случаев отмечались при антициклональном типе погодных условий, из них в 42 % случаев в центре антициклона, где осуществляются нисходящие движения холодных воздушных масс из вышележащих слоев атмосферы (табл. 5). В 25 % случаев максимальное содержание озона наблюдалось на фоне пониженного давления у поверхности земли, преимущественно в тыловой части циклонов (12 %). В 15 % случаев отмечалось малоградиентное барическое поле повышенного или пониженного атмосферного давления (МБП).

Таблица 5

Средняя многолетняя повторяемость (%) различных типов атмосферных процессов у поверхности земли при anomalно высоких значениях ОСО (max) в Иркутске в 2005–2009 гг.

Тип барического поля						
циклон			антициклон			МБП
тыл	центр	передняя часть	периферия		центр	
			западная	восточная		
12	4	9	5	13	42	15

Аномально низкие значения ОСО в Иркутске примерно равновероятны в циклональном (36 %) и антициклональном (44 %) барическом поле у поверхности земли (табл.6).

Таблица 6

Средняя многолетняя повторяемость (%) различных типов атмосферных процессов у поверхности земли при anomalно низких значениях ОСО (min) в Иркутске в 2005–2009 гг.

Тип барического поля						
циклон			антициклон			МБП
тыл	теплый сектор	передняя часть	периферия		центр	
			западная	восточная		
5	3	28	10	12	22	20

В большинстве случаев (75 %) anomalно высокие значения ОСО в Иркутске отмечались при прохождении основных холодных фронтов и адвекции холодной арктической или северной умеренной воздушной массы в тыловой части циклонов или на восточной периферии антициклонов (рис. 4). Anomalно низкие значения ОСО в Иркутске в 73 % случаев наблюдались при адвекции теплой южной умеренной воздушной массы и прохождении основных теплых атмосферных фронтов в передней части циклонов.

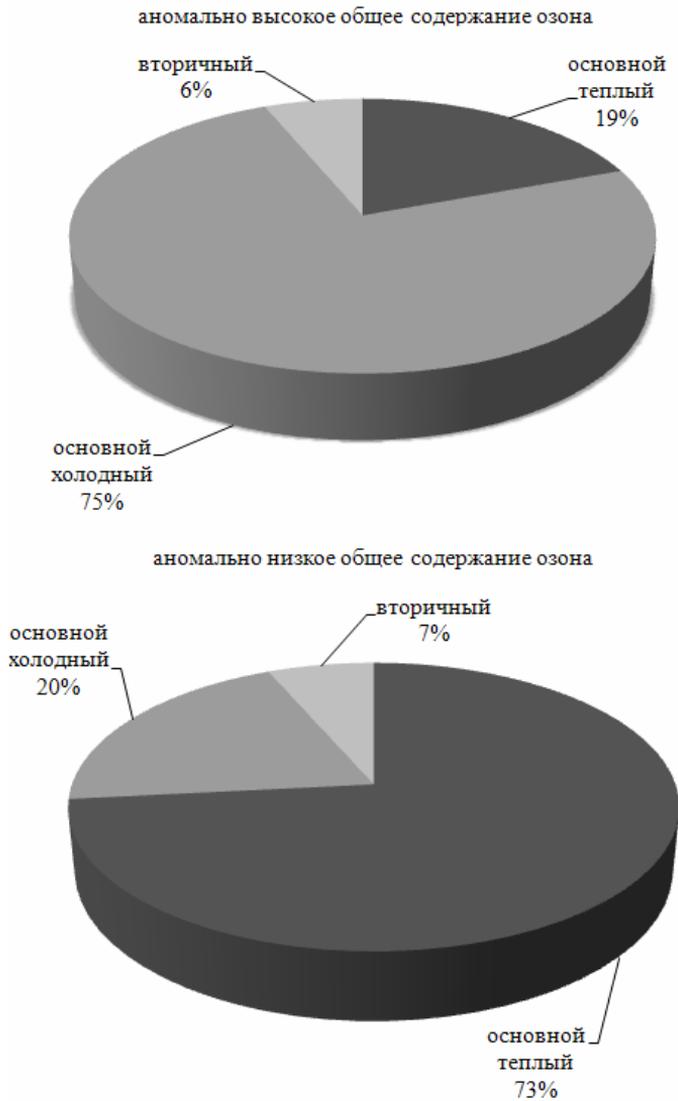


Рис. 4. Средняя многолетняя повторяемость (%) различных типов атмосферных фронтов у поверхности земли при anomalно низких и высоких значениях ОСО в Иркутске в 2005–2009 гг.

В исследуемый период (2005–2009 гг.) аномально низкое содержание озона в Иркутске наблюдалось 6 ноября 2006 г. и составляло 240 е. Д. Синоптические условия определялись влиянием динамически значимого теплого фронта, проходящего вдоль оси ложбины ныряющего циклона глубиной 995 гПа с центром над Якутией (рис. 5 а). Контрасты температур в зоне атмосферного фронта составляли на уровне АТ-850 гПа 16 °С/1000 км, в области высотной фронтальной зоны (ВФЗ) на уровне АТ-700 гПа (3 км) – 20 дкм/1000 км, на АТ-500 гПа (5 км) – 24 дкм/1000 км, т. е. возрастали с высотой. На районы Иркутска осуществлялась адвекция теплой сухой воздушной массы с территории Красноярского края и юга Западной Сибири, которая составила порядка 12 °С/сут. На всех уровнях тропосферы отмечались восходящие токи.

Аномально высокое содержание озона в Иркутске составляло 522 е. Д. и наблюдалось 20 февраля 2006 г. на восточной периферии обширного Азиатского антициклона после прохождения холодного фронта в тыловой части южного циклона глубиной 990 гПа с центром над Забайкальем. Погодные условия в Иркутске определялись вторжением холодной арктической воздушной массы в тыловой части высотной макроложбины с очагами холода над югом Урала, Якутией и Патомским нагорьем. На всех уровнях тропосферы отмечались интенсивные нисходящие токи. На АТ-300 гПа (9 км) через районы Иркутска проходила ось полярно-фронтального струйного течения.

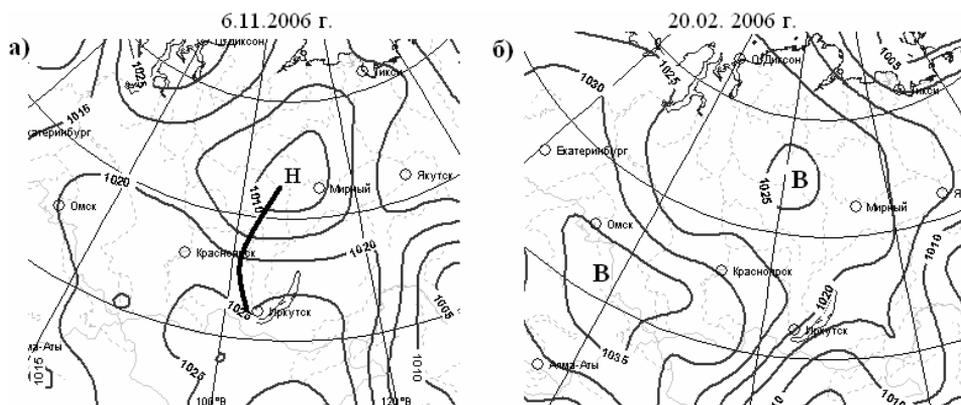


Рис.5. Приземные барические карты при аномально низких (а) и высоких (б) значениях ОСО в Иркутске в 2006 г.

Заключение

В работе дана оценка современного состояния атмосферного озона и циркуляционных факторов формирования опасных концентраций озона в Иркутске.

Установлено уменьшение общего содержания озона (ОСО) в Иркутске в последние десятилетия на фоне повышения средних годовых температур и увеличения вклада меридиональных южных и северных процессов по

сравнению с периодом повышенной продолжительности зональных процессов в 1970–1980 гг. Наиболее быстро ОСО уменьшается весной.

В периоды формирования экстремальных значений ОСО в Иркутске существенно различался характер атмосферных процессов у поверхности земли и на высотах. Следовательно, существенный вклад в изменение концентрации озона в Иркутске вносят динамические процессы, которые проявляются во взаимосвязи подвижного цикло- и антициклогенеза с тропосферно-стратосферным обменом и вертикальным переносом озона.

Список литературы

1. Анализ межгодовых изменений общего содержания озона над территорией России в 1973–2002 гг. по данным измерений наземных станций / И. Л. Кароль, О. А. Сыроваткина, А. А. Соломатникова, А. М. Шаламянский // *Метеорология и гидрология*. – 2006. – № 4. С. 19–25.

2. *Белан Б. Д.* Суточный ход концентрации приземного озона в районе г. Томска / Б. Д. Белан, Т. К. Складнева // *Метеорология и гидрология*. – 2001. – № 5. – С. 50–57.

3. *Васильев В. И.* Исследование изменчивости общего содержания озона в зоне действия тропических циклонов // *Метеорология и гидрология*. – 2005. – № 12. – С. 28–31.

4. *Васильев В. И.* Классификация и представление внутрисуточных трендов общего содержания озона / В. И. Васильев, С. П. Перов // *Метеорология и гидрология*. – 2006. – № 4. – С. 29–33.

5. *Галин В. Я.* Моделирование влияния изменений спектральных потоков солнечной радиации, вызванных солнечной активностью, на содержание атмосферного озона / В. Я. Галин, П. А. Зименко, А. П. Кудрявцев // *Метеорология и гидрология*. – 2005. – № 8. – С. 25–29.

6. *Галин В. Я.* Модель общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН с динамикой озона / В. Я. Галин, Е. М. Володин, С. П. Смышляев // *Метеорология и гидрология*. – 2003. – № 5. – С. 13–21.

7. *Жадин Е. А.* Эмпирический метод оценок воздействия естественных и антропогенных факторов на общее содержание озона // *Метеорология и гидрология*. – 2000. – № 3. – С. 5–14.

8. *Жадин Е. А.* Озон и изменения приземной температуры / Е. А. Жадин // *Метеорология и гидрология*. – 2004. – № 10. – С. 64–70.

9. *Звягинцев А. М.* Основные характеристики изменчивости содержания озона в нижней тропосфере над Европой // *Метеорология и гидрология*. – 2004. – № 10. – С. 46–53.

10. *Звягинцев А. М.* Периодическая изменчивость приземной концентрации озона в Западной и Центральной Европе по данным наблюдений / А. М. Звягинцев, Г. М. Крученицкий, О. А. Тарасова // *Метеорология и гидрология*. – 2008. – № 3. – С. 38–44.

11. Инверсии температуры и их влияние на концентрацию приземного озона в окрестностях Кисловодска / И. Н. Кузнецова, Н. Ф. Еланский, И. Ю. Шалыгина, Е. Н. Кадыгров // *Метеорология и гидрология*. – 2002. – № 9. – С. 40–45.

12. Исследование состояния озонового слоя в зимне-весенний период 2000 г. с помощью баллонных измерений и наземных наблюдений в Сибири /

В. А. Юшков, Н. Д. Цветкова, В. М. Дорохов, В. И. Ситникова // *Метеорология и гидрология*. – 2002. – № 12. – С. 27–31.

13. *Кононова Н. К.* Влияние изменения характера атмосферной циркуляции на активность опасных природных процессов / Н. К. Кононова, И. В. Мальнева // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. – М., 2003. – № 4. – С. 52–62.

14. *Локощенко М. А.* Температурная стратификация и высотная изменчивость озона в нижней тропосфере по данным акустического и аэростатного зондирования / М. А. Локощенко, Д. М. Шифрин // *Метеорология и гидрология*. – 2009. – № 2. – С. 14–24.

15. *Маричев В. Н.* Влияние глобальных геофизических процессов на формирование вертикального распределения озона и температуры над Западной Сибирью / В. Н. Маричев, И. Л. Галкина, Г. М. Крученицкий // *Метеорология и гидрология*. – 2003. – № 11. – С. 44–50.

16. Межгодовые особенности формирования полей общего содержания озона в высоких широтах Северного полушария в ноябре–марте 1998–2005 гг. / О. А. Сыроваткина [и др.] // *Метеорология и гидрология*. – 2008. – № 2. – С. 47–53.

17. Моделирование межгодовых изменений общего содержания озона в 1993–2000 гг. и влияние ограничений производства озоноразрушающих веществ / Т. А. Егорова, Е. В. Розанов, И. Л. Кароль, В. А. Зубов // *Метеорология и гидрология*. – 2002. – № 1. – С. 5–13.

18. *Нерушев А. Ф.* Воздействие интенсивных атмосферных вихрей на озоновый слой Земли / А. Ф. Нерушев. – СПб. : Гидрометеиздат, 2003. – 223 с.

19. Общее содержание озона над территорией Российской Федерации и прилегающих стран по 30-летним измерениям наземных станций / А. М. Шаламянский [и др.] // *Метеорология и гидрология*. – 2004. – № 8. – С. 24–28.

20. Переведенцев Ю. П. Теория климата / Ю. П. Переведенцев. – Казань : Изд-во Казан. ун-та, 2009. – 503 с.

21. *Ролдугин В. К.* Постоянство общего содержания озона при вторжении релятивистских протонов // *Метеорология и гидрология*. – 2000. – № 10. – С. 53–57.

22. Связь концентрации озона с концентрацией окислов азота и температурой воздуха в приземном слое атмосферы г. Улан-Удэ / В. П. Бутуханов [и др.] // *Метеорология и гидрология*. – 2005. – № 10. – С. 21–27.

23. Спектральные измерения ультрафиолетовой радиации в Восточной Сибири в период аномалии общего содержания озона / А. В. Михалев [и др.] // *Метеорология и гидрология*. – 2000. – № 3. – С. 16–21.

24. Статистический анализ и сравнение эффектов внешних факторов, влияющих на поле общего содержания озона над территорией России в 1973–2007 гг. / Е. А. Титова [и др.] // *Метеорология и гидрология*. – 2009. – № 7. – С. 48–54.

25. *Хргиан А. Х.* Физика атмосферного озона / А. Х. Хргиан. – Л. : Гидрометеиздат, 1973. – 286 с.

Modern features of the distribution ozone in Irkutsk

I. V. Latysheva, K. A. Loshchenko, E. V. Miller

Annotation. The article is devoted to problem of atmospheric ozone. We consider modern features in the distribution of ozone in Irkutsk and influence meteorological parameters of ozone.

Key words: climate, circulation of atmosphere, meteorological parameters, gaseous admixtures, ozone.

Латышева Инна Валентиновна
кандидат географических наук, доцент
Иркутский государственный университет
664033, Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 52-10-94

Миллер Елена Владимировна
ведущий инженер
Иркутский государственный университет
664033, Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 52-10-94

Лощенко Кристина Анатольевна
ведущий инженер
Иркутский государственный университет
664033, Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 52-10-94