

УДК 551.510

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНА НАД МОСКВОЙ

Е. П. Кропоткина, Ю. А. Пирогов, С. Б. Розанов, С. В. Соломонов

Приведены результаты регулярных наблюдений вертикального распределения содержания озона на миллиметровых радиоволнах в период с 1996 по 1999 гг. Наблюдения проводились с помощью размещенного в Москве спектрорадиометра на частотах спектральной линии озона с центром на 142.175 ГГц. Изучены особенности сезонных вариаций стратосферного озона. Установлена связь обнаруженного уменьшения озона с процессами в полярном вихре.

Актуальность исследований озонового слоя возросла в связи с наметившимся уменьшением озона в полярных и умеренных широтах обоих полушарий и аномальными явлениями в озоносфере (озонные "дыры" и "минидыры") (см., например, [1, 2]). Обнаруженная убыль озона, в которую, как полагают, вносит вклад загрязнение атмосферы промышленными хлорфторуглеродами и другими веществами [1, 2], происходит на фоне изменений в озоносфере, вызванных естественными причинами. К ним относятся, например, изменения в озоновом слое под воздействием процессов атмосферной динамики, планетарных и внутренних гравитационных волн, под влиянием солнечной активности, химических процессов и других факторов.

Труднопредсказуемые особенности динамических и химических процессов в атмосфере, неконтролируемость ее загрязнений осложняют прогнозирование убыли озона и возникновения аномальных явлений в озоновом слое, которые могут быть связаны как с естественными, так и с техногенными воздействиями на озоносферу [2]. Поэтому важной задачей является изучение степени влияния на озон тех или иных факторов.

Для изучения происходящих изменений в озоносфере выполняются многочисленные наземные и спутниковые измерения общего содержания озона, т.е. количества всех молекул озона в столбе воздуха единичного сечения. Основной вклад в общее содержание озона вносят молекулы озона, расположенные в толще атмосферы ниже 30 км. Вместе с тем, необходимы данные о состоянии отдельных слоев озоносферы, о происходящих изменениях в вертикальном распределении озона в стратосфере и мезосфере. Например, важно знать, что происходит с вертикальным распределением озона в верхних слоях стратосферы (высоты между 30 и 50 км), где, согласно фотохимической теории, в результате химических реакций с участием хлора происходит убыль озона, наиболее выраженная вблизи 40 км [2].

Важно также изучение закономерностей наметившегося истощения озонового слоя в более низких слоях стратосферы, в которых содержание озона определяется переносом воздушных масс, атмосферной динамикой. Одной из возможных причин уменьшения озона в средних широтах могут быть процессы разрушения озона в полярном стратосферном вихре и возможное влияние этих процессов на озоносферу в полярных и средних широтах. Известно [2], что разрушение озона в полярном вихре происходит в результате гетерогенных реакций при низких температурах на частицах полярных стратосферных облаков на высотах примерно 15 – 20 км. Значительное уменьшение озона в полярном вихре при его смещении в средние широты было обнаружено также и в более высоких слоях стратосферы [3, 4]. Для исследования этих явлений необходимы измерения вертикального профиля содержания озона внутри центральной области полярного стратосферного вихря и вне ее. Полярный стратосферный вихрь, центр которого обычно располагается в высоких широтах, возникает каждый год при осенней перестройке циркуляции стратосферы. В условиях значительных возмущений стратосферы полярный вихрь может смещаться к Европе. При этом воздух центральной области полярного вихря может достигать средних широт (см., например, [2]), что делает реальным проведение указанных выше исследований на широте Москвы [3, 4].

К числу фундаментальных задач относится также изучение мезосферного озона и процессов, влияющих на его изменения. Для этого необходимы данные о вертикальном распределении содержания озона выше 50 км, где из-за небольшого времени жизни молекул озона их содержание в основном определяется фотохимическими процессами.

Новые данные о вертикальном распределении озона необходимы для построения современной справочной модели озоносферы, отражающей происходящие в ней изменения.

Для решения перечисленных задач, для изучения природы происходящих измене-

ний озона необходимы регулярные наблюдения вертикального распределения содержания этой малой газовой составляющей в широком диапазоне высот в стратосфере и мезосфере. К сожалению, измерение профиля озона наземными оптическими методами (метод обращения, лидары) ограничены высотами около 40 – 45 км. Измерения профилей содержания озона с помощью шаров-озонзондов характеризуются предельными высотами 30 – 35 км.

Развитые в ФИАН радиофизические методы оказываются эффективными для исследования озоносферы, позволяя оперативно определять вертикальный профиль содержания озона в необходимой для этого области высот от 15 до 75 км [3, 4]. В отличие от наблюдений озона с помощью наземных оптических методов, возможности которых ограничены неблагоприятными метеорологическими условиями, регулярные наблюдения (мониторинг) атмосферного озона на миллиметровых волнах позволяет получать данные о вертикальном профиле содержания озона в труднодоступных слоях атмосферы круглосуточно и при различных атмосферных условиях (включая условия сплошной облачности, слой аэрозоля и др.).

В данной работе представлены результаты исследований вертикального распределения содержания стратосферного озона, выполненных радиофизическими методами на миллиметровых волнах в ФИАН в период регулярных наблюдений с 1996 г. по 1999 г. с помощью автоматизированного спектро радиометра (озонметра) [3].

На миллиметровых волнах с поверхности Земли регистрируется тепловое излучение озона на частотах одной из сильных линий его вращательного спектра с центром на 142.175 ГГц. Уширение наблюдаемой спектральной линии определяется столкновениями молекул и пропорционально давлению примерно до высот 70 – 75 км. Информация о вертикальном профиле озона заключена в контуре спектральной линии. Измерение этой линии практически без искажения обеспечивается высокой чувствительностью спектро радиометра и его высоким спектральным разрешением (до 10^{-6} в центре линии). Для определения вертикального распределения озона по измеренной спектральной линии используется алгоритм [5], основанный на методе Тихонова. Погрешности восстановленных профилей озона, как правило, не превосходят 5 – 7% для высот от 20 до 50 км и не превышают 20 – 30% в остальной части исследуемой области высот. Особенностью радиофизических методов является реализованная с их помощью возможность надежной регистрации вертикального распределения озона в течение длительного периода времени, что важно для выявления в озоносфере изменений различной длительности (суточных, сезонных, годовых изменений и более долговременных трендов). При обра-

ботке результатов наблюдений на миллиметровых волнах были использованы данные аэрологического зондирования (вертикальные профили температуры и давления, поля геопотенциала, значения общего содержания озона и потенциальной завихренности), любезно предоставленные Гидрометцентром и Центральной аэрологической обсерваторией. Озонометр ФИАН был включен в состав глобальной озонометрической сети по ряду международных программ: DYANA (1990 г.), CRYSTA/MAHRSI (1994 г.), CRISTA/MAHRSI-2 (1997 г.), SOLVE 2000 (1999-2000 гг.). Полученные с помощью этого озонометра профили озона совпадают в пределах погрешностей измерений со спутниковыми и озонозондовыми данными.

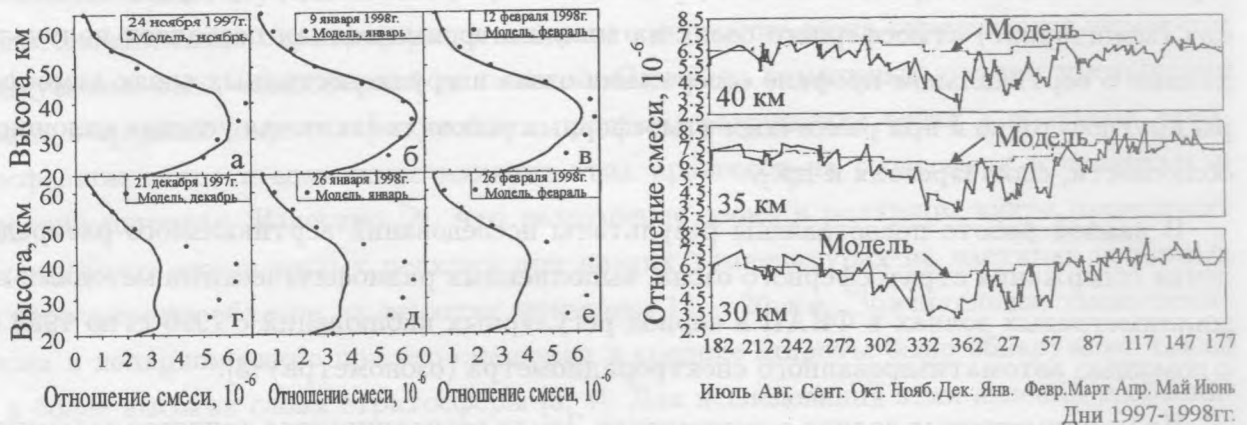


Рис. 1. Примеры вертикального распределения содержания озона над Москвой в холодный период 1997-1998 гг. вне центральной области полярного вихря (а-в) и в пределах центральной области полярного вихря (г-е).

Рис. 2. Содержание озона над Москвой в слоях на 30, 35 и 40 км в период с июля 1997 по июнь 1998 гг.

Регулярные наблюдения на миллиметровых волнах позволили получить высотное временное распределение содержания озона над Москвой. Вертикальное распределение стратосферного озона характеризовалось значительной изменчивостью. Примеры вертикальных профилей озона и их изменения, наблюдавшиеся в холодное полугодие 1997-1998 гг., показаны на рис. 1 (здесь и ниже представлены результаты наблюдения озона в дневное время, содержание озона на рисунках дано в единицах отношения смеси, 10^{-6}). Получены новые данные о сезонном ходе озона на разных высотах. Пример сезонных вариаций содержания озона в слоях на высотах 30, 35 и 40 км за период с июля

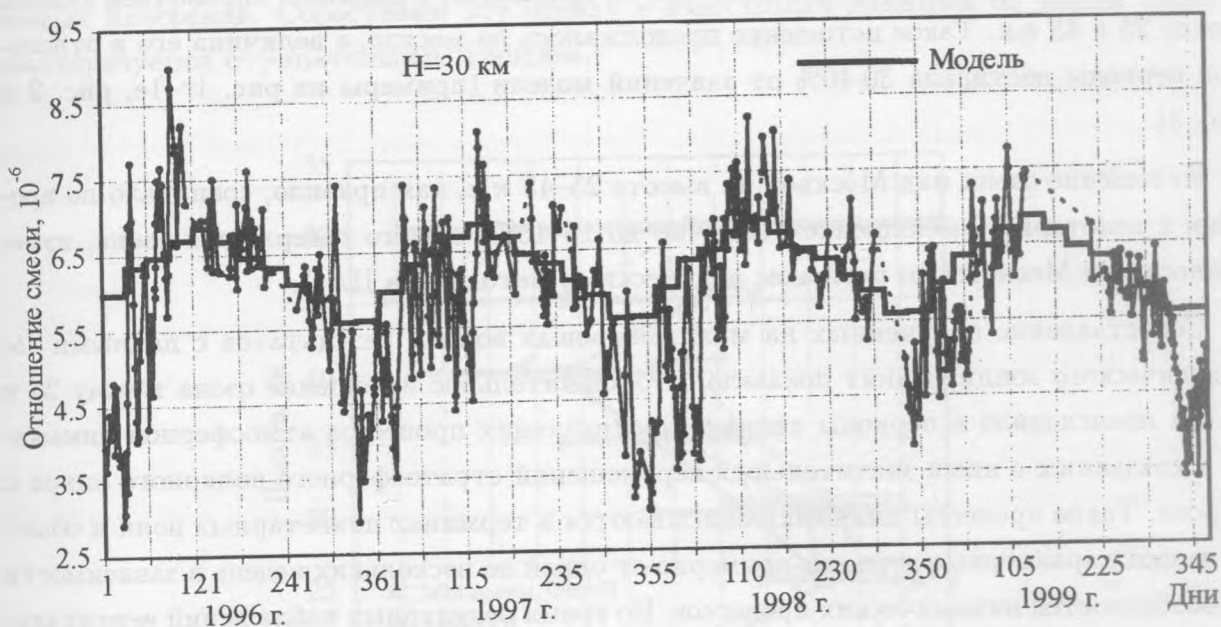


Рис. 3. Изменения содержания озона на 30 км над Москвой за период с 1996 по 1999 гг.

1997 г. по июнь 1998 г. показан на рис. 2. Сезонные изменения озона приводят к колебаниям содержания озона в стратосфере с периодом 1 год. Такие годовые изменения видны на примере, показанном на рис. 3 для высоты 30 км с 1996 г. по 1999 г. На рис. 1 – 3 нанесены также среднемесячные данные из справочной модели озоносферы [6], соответствующие широте Москвы.

Наблюдения на миллиметровых волнах показали, что на фоне сезонных изменений озона в средней стратосфере существуют также более короткопериодные вариации озона (примеры на рис. 2 и рис. 3) с характерными временами от одной до нескольких недель. Как следует из рис. 2 и 3, годовые изменения характеризовались колебаниями содержания озона от более высоких значений в весенне-летний период к более низким значениям в холодное полугодие. Видно, что изменения содержания озона с периодом, равным году, качественно соответствуют данным модели [6]. Вместе с тем обращает на себя внимание заметное систематическое отклонение результатов измерений на миллиметровых волнах от этой модели, наиболее заметное в холодное полугодие. Необходимо отметить близость к модели профилей озона, зарегистрированных в теплое полугодие. В отдельные периоды холодного полугодия профили озона были также близки к модели (примеры на рис. 1а-1в), однако в эти же холодные полугодия было обнаружено зна-

чительное уменьшение (истощение) озона по сравнению с данными справочной модели между 25 и 45 км. Такое истощение продолжалось до месяца, а величина его в отдельные периоды достигала 30-40% от значений модели (примеры на рис. 1г-1е, рис. 2 и рис. 3).

Истощение озона над Москвой на высоте 25-45 км, как правило, совпадало по времени с некоторым уменьшением (обычно до 10-15%) общего содержания озона, измеренного над Московским регионом оптическими методами в ЦАО.

Сопоставление полученных на миллиметровых волнах результатов с данными аэрологического зондирования показало, что значительное истощение озона между 25 и 45 км происходило в периоды активно протекающих процессов атмосферной динамики и связанных с ними значительных перемещений стратосферного полярного вихря к Европе. Такие процессы динамики описываются в терминах планетарных волн и обычно имеют характерные периоды примерно от одной до нескольких недель в зависимости от особенностей динамических процессов. Во время регулярных наблюдений вертикального распределения озона над Москвой в холодное полугодие высотное распределение озона, близкое к модели (рис. 1а-1в), было зарегистрировано, когда полярный вихрь удалялся от Москвы. Когда же полярный вихрь смещался к Европе и над Москвой появлялся воздух центральной области полярного вихря, возникало истощение озона (рис. 1г-1е). Результаты наблюдений на миллиметровых волнах позволяют сделать вывод о сильном влиянии процессов в полярном вихре на вертикальное распределение озона, на его истощение в средней и верхней стратосфере. Эти результаты свидетельствуют в пользу гипотезы изолированности воздуха внутри вихря [2], которая затрудняет приток воздуха извне.

В результате усреднения полученных на миллиметровых волнах данных за весь период наблюдений с 1996 по 1999 гг. обнаружено заметное отклонение среднегодового экспериментального профиля содержания озона $C(h)$ от соответствующего профиля $C(h)_M$, построенного из усредненных за год данных из модели [6]. Относительная величина этого отклонения $X = \{[C(h) - C(h)_M]/C(h)_M\}100\%$ отрицательна и меняется с высотой. Наибольшее отличие от модели оказалось на 40 км, где X составляет около -13%. В это отличие наибольший вклад вносит отклонение от модели высотного распределения озона в холодное полугодие. Поскольку в основу использованных нами данных из модели [6] положены результаты измерений со спутников в период с конца 70-х по начало 80-х гг., то обнаруженное отличие от модели можно рассматривать в качестве оценки убыли озона, происшедшей в озоносфере со времени указанных спут-

никовых измерений. Сопоставим эту оценку с известными данными об убыли озона, характеризующей отрицательным трендом.

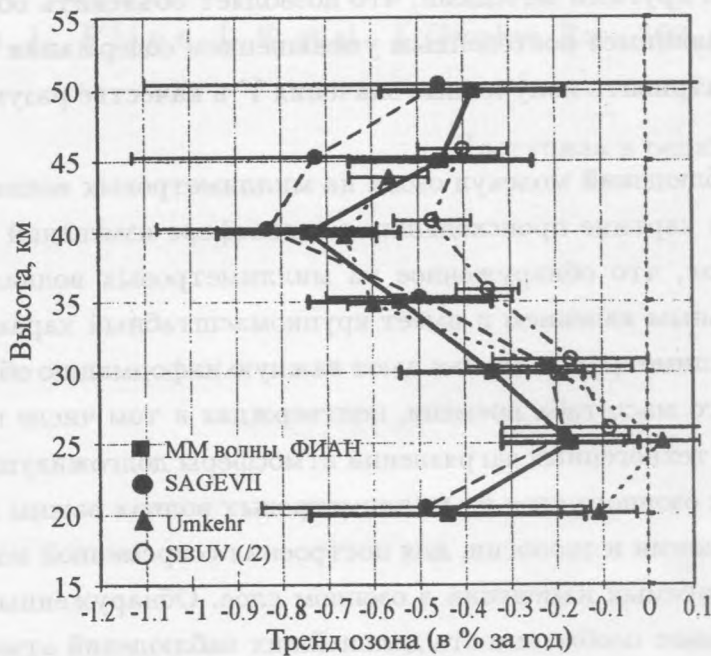


Рис. 4. Тренд озона (в % в год) по данным из работы [2] и значения Y , рассчитанные по результатам наблюдений на миллиметровых волнах над Москвой (см. текст).

На рис. 4 представлены экспериментальные данные о тренде озона над средними широтами Северного полушария (рис. 4-31 из работы [2]). Эти результаты получены оптическими методами со спутников (эксперименты SAGE I, II, SBUV, SBUV II) и при наземных оптических измерениях в обсерваториях Польши, Франции и США. Видно, что наибольшая убыль озона происходит вблизи 40 км, где тренд составляет примерно от -0.5 до -0.8% в год. В соответствии с расчетами [2], эта убыль вызвана потерями озона в газофазных каталитических реакциях с участием хлора. Наименьшая убыль озона зарегистрирована на 25 км. На этом же рисунке представлены значения $Y = X'/m$, полученные из сопоставления с моделью [6] результатов наблюдений на миллиметровых волнах над Москвой. Здесь $X' = X - q$, где поправка q , много меньшая X , введена для учета влияния на содержание озона изменений солнечной активности в пределах 11-летнего цикла [7], а $m = 17$ есть время в годах, прошедших между измерениями на миллиметровых волнах в ФИАН в 1996-99 гг. и спутниковыми измерениями, положенными в основу модели [6] (спутниковые измерения отнесены к концу 1980 г., а

измерения в ФИАН – к концу 1997 г.). Горизонтальными отрезками на рис. 4 показаны доверительные интервалы, соответствующие вероятности 0.95. Из этого рисунка видно, что значения Y хорошо согласуются с данными о долговременных изменениях профиля озона из измерений другими методами, что позволяет объяснить обнаруженное отклонение X' продолжающимся постепенным уменьшением содержания озона над Москвой и позволяет рассматривать полученные значения Y в качестве разумной оценки такого уменьшения за год.

Результаты наблюдений молекул озона на миллиметровых волнах над Москвой соответствует общей картине происходящих в озоносфере изменений (см., например, [1, 2, 7]) и показывают, что обнаруженное на миллиметровых волнах истощение озона не является локальным явлением и имеет крупномасштабный характер. Выполненные наблюдения на миллиметровых волнах дают важную информацию об изменениях в озоновом слое различного масштаба времени, подтверждая в том числе прогнозы об убыли озона в результате техногенных загрязнений атмосферы долгоживущими соединениями хлора. Наблюдения озонового слоя на миллиметровых волнах важны для решения актуальных задач аэрономии и экологии, для построения современной модели озоносферы и проверки прогнозируемых изменений в озоновом слое. Обнаруженные изменения в озоносфере подтверждают необходимость дальнейших наблюдений атмосферного озона на миллиметровых волнах.

Авторы выражают глубокую благодарность чл.-корр. РАН И. И. Собельману и проф. Р. Л. Сороченко за поддержку и внимание к данной работе, а также Г. М. Крученицкому и В. А. Юшкову (ЦАО) и Т. Г. Иванидзе и Т. С. Кружковой (ГМЦ) за любезно предоставленные данные аэрологического зондирования. Авторы признательны А. Н. Лукину и В. Н. Леонову за участие в обработке результатов наблюдений. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, гранты N 99-02-18132 и N 00-05-64976.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Waters J. W., Froidevaux L. et al. Nature, **362**, no. 6421, 597 (1993).
- [2] Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998, WMO, Global Ozone Research and Monitoring Project – Rep. No 44, 1999, Geneva-2, Switzerland.
- [3] Solomonov S. V., Rozanov S. B. et al. Proc. SPIE, **3406**, 135 (1998).
- [4] Соломонов С. В., Кропоткина Е. П. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 1, 23 (1998).

- [5] Гайкович К. П., Кропоткина Е. П., Соломонов С. В. Известия АН, физика атмосферы и океана, **35**, N 1, 86 (1999).
- [6] Keating G. M., Chiou L. S., Hsu N. S. Adv. Space Res., **18**, no. 9/10, 11 (1996).
- [7] Miller A. J., Flinn L. E. et al. J. Geophys. Res., **102**, no. D15, 19257 (1997).

Поступила в редакцию 30 июня 2000 г.