

В.В. Осечкин, С.С. Смирнов

**ЕЩЁ РАЗ О МЕРИДИОНАЛЬНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ
ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ И ПЛОТНОСТИ ОЗОНА В СТРАТОСФЕРЕ**

V.V. Osetchkin, S.S. Smirnov

**ONCE MORE ON THE MERIDIONAL OF TOTAL OZONE
AND OZONE DENSITY IN THE STRATOSPHERE**

В краткой форме обобщаются результаты предыдущих исследований, выполняющихся автором с 1987 г., обращается внимание на то, что общее содержание и плотность озона в стратосфере — это различные характеристики одной атмосферной субстанции. Это означает, что меридиональное распределение общего содержания озона и плотности озона в стратосфере подчиняются различным законам. На меридиональное распределение общего содержания озона существенное воздействие оказывают галактические космические лучи во время зимне-весеннего периода в полярной стратосфере. Меридиональное распределение плотности озона в стратосфере строго следует изменению высоты солнца и фотохимической теории.

Ключевые слова: общее содержание озона в стратосфере, фотохимическая теория.

The findings of the previous researches had been carried out over 30 years by the authors (since 1987) are briefly summarized. It is focused that total ozone and the ozone maximum density layer are the different characteristics of the same atmospheric substance. That means that meridional distribution of total ozone and ozone maximum density layer are brought about by the various laws. The meridional distribution of the total ozone is basically caused by the impact of the galactic space rays during the winter-spring period over the polar and subpolar regions. The meridional distribution of the ozone maximum density layer follows strictly the changes in the sun height and the photochemical theory.

Key words: total ozone, ozone density layer, photochemical theory.

*Памяти Евгения Владимировича Гниловского,
с которым один из авторов успешно сотрудничал
более 30 лет.*

Вопрос о природе меридионального распределения озона в атмосфере сразу после получения первых результатов измерений на созданной Гарольдом Митчелом Добсоном (1927) сети станций наблюдений общего содержания озона в различных географических районах земного шара.

Результаты уже первых наблюдений показали, что общее содержание озона в направлении от экватора к Северному полюсу увеличивалось, что противоречило общефизическим представлениям.

Однако опубликованные вскоре данные наблюдений не обескуражили другого выдающегося английского геофизика Сиднея Чепмэна. Выступая в Лондонском

Королевском обществе (Академия наук Великобритании) с докладом о только что созданной им (1929) фотохимической теории стратосферного озона (пять классических кислородных реакций), Чепмэн дальновидно (а скорее, интуитивно) заметил (основываясь, конечно, на данных наблюдений), что свою теорию он разработал для географического пояса, ограниченного 45-ю параллелями к северу и югу от экватора.

В работе [11] все предлагавшиеся к этому времени гипотезы, призванные объяснить несоответствие фотохимической теории данным меридионального распределения озона, мы условно разделим на две категории: **традиционные** и **нетрадиционные**. В настоящей работе нет смысла подробно останавливаться на содержании этих гипотез, поэтому мы предлагаем исследователям, интересующимся этим вопросом, обратиться к упомянутой работе, в которой суть гипотез изложена достаточно подробно. Здесь же мы лишь подведем краткие итоги исследований, изложенных в работе [11].

Традиционные гипотезы — это гипотезы, в которых меридиональное распределение общего содержания озона объясняют с позиций динамики атмосферы.

Первую «динамическую» гипотезу предложил еще в 1929 г. Г.М. Добсон. Суть предложенной гипотезы состояла в следующем: озон в системе общей циркуляции атмосферы переносится из экваториальной стратосферы (где он, согласно гипотезе, образуется) в полярные широты с постоянным снижением высоты «центра тяжести» (термин, введенный еще в 1934 г. В.А. Амбарцумяном, впоследствии знаменитым астрофизиком) озонового слоя.

Значительно позже (80–90 гг. XX в.), анализируя гипотезу Добсона, проф. К.В. Кондратович с присущим ему юмором назвал её «синдромом булки с изюмом». Это означает, что «булка» (слой атмосферного воздуха) переносится в полярные широты и в системе общей циркуляции атмосферы переносится назад к экватору, а «изюм» (озон) каким-то непонятным образом не только остается в полярной области, но даже от зимы к весне увеличивается в своем количестве.

Гипотеза Добсона оказалась живучей. Её эксплуатируют уже многие десятилетия вплоть до настоящего времени. Долгожительством этой гипотезы связано прежде всего с бурным развитием в 70–80-е гг. XX в. электронно-вычислительной техники и численных методов решения физических задач. Это дало толчок к появлению многочисленных числовых моделей для описания тех или иных физических процессов. Естественно, «модельеры» (так часто называют специалистов по численному моделированию) ухватились за динамическую гипотезу Добсона, так как, как в свое время А.Х. Хргиан, она оказалась очень удобной для численного моделирования, но исключительно сложной для экспериментальной проверки. При этом подчеркнем, что моделирование любого физического процесса или явления, не наполненного физическим содержанием, не имеет перспективы. Мы здесь не будем подробно рассматривать многочисленные попытки «спасти» динамическую гипотезу — основные исследования этого направления рассмотрены в итоговой публикации [11]. Здесь лишь отметим, что авторы этих работ довольно «свободно» распоряжаются такими параметрами, как скорость нисходящих движений в стратосфере, коэффициенты турбулентного обмена, крупномасштабный перенос из экваториальной области в полярные широты и т.д. — и все это делалось ради того, чтобы объяснить механизм роста общего содержания озона от экватора к полюсам. Например, Пайл и Роджерс [17] для обеспечения роста общего содержания озона в полярных широтах от

осени к весне увеличили коэффициенты турбулентности в стратосфере в 100–200 раз (!!!), чего в реальных условиях не наблюдалось. Этот пример и многие другие, рассмотренные в статье [11], убедительно показали, что динамическое направление, используемое для обеспечения механизма формулирования меридионального распределения общего содержания озона, оказалось несостоятельным. Отсюда возникла необходимость в поиске какого-либо другого механизма, который мог бы объяснить специфику меридионального распределения озона. Нам представляется, что таким механизмом могли бы быть какие-либо внеземные или даже земные, но нетрадиционные механизмы.

Нетрадиционные гипотезы и механизмы

Нетрадиционные гипотезы — это гипотезы, которые объясняют природу меридионального распределения озона не с позиций динамики атмосферы, а с позиций внешнего воздействия некоторых сил, направленных из околоземного пространства. Такие воздействия описаны в работе [11], поэтому ограничимся лишь краткими выводами, изложенными в упомянутой работе.

1. Впервые на возможную роль космических лучей в формировании полярной озоносферы указал немецкий геофизик Андерсон в 1929 г. [15]. В силу различных обстоятельств конкретного физического механизма Андерсон не предложил.
2. Российский астрофизик Д.И. Еропкин [2] пытался объяснить повышенное содержание озона в полярной стратосфере на основе астрономического закона планетных расстояний. Эта гипотеза впоследствии не подтвердилась.
3. К.В. Кондратович [3] выдвинул гипотезу, согласно которой в районы мировых геомагнитных аномалий (с повышенной геомагнитной напряженностью), расположенные в полярных и субполярных широтах, происходит сток молекулярного кислорода атмосферы за счет его высокой парамагнитной восприимчивости, или ориентационного парамагнетизма. Этот механизм, как предполагал К.В. Кондратович, должен был обусловить процесс дополнительного озонообразования в полярной стратосфере. Однако оценка, выполненная в работе [4], показала, что на фоне теплового движения в атмосфере ролью дрейфа молекулярного кислорода можно пренебречь.
4. Из перечисленных выше авторов ближе всех к решению рассматриваемой проблемы оказался Б.И. Сазонов [13, 14], который предложил следующий механизм. Дополнительное озонообразование в полярной стратосфере происходит за счет непосредственного воздействия частиц солнечного и космического происхождения (протонов) на атомы воздуха путем нуклон-ядерных взаимодействий. Однако последующие вычисления, выполненные в работе [6], показали, что этот механизм энергетически не в состоянии объяснить процесс дополнительного озонообразования в полярной стратосфере.
5. И ещё один механизм из категории нетрадиционных. Это механизм электронных высыпаний. Не останавливаясь на этих процессах, так как они подробно рассмотрены в работе [11], сделаем лишь вывод: действие низкоэнергетичных частиц солнечного происхождения ограничивается высотами 50–80 км и на баланс озоносферы никакого существенного воздействия не оказывает [8].

6. Переходим к главной и заключительной части настоящей работы — к описанию еще одной нетрадиционной гипотезы, которую мы исследовали более 25 лет (с 1987 г.) и которую можно без преувеличения назвать реальным физическим механизмом.

Предлагаемый механизм подробно описан во многих работах авторов [5–11]. Остановимся здесь на кратких выводах упомянутых исследований.

Известно, что во время полярной ночи солнечная УФР отсутствует. Также известно, что в нижней зимней полярной стратосфере консервативность озона в зависимости от высоты составляет от 100 до 500 суток [18]. При такой высокой направленности содержание озона в полярной стратосфере должно было бы сохраниться до весны на осеннем уровне. В действительности во время полярной ночи ежегодно наблюдается рост общего содержания озона от осени к весне. Этот факт указывает на существование в полярной стратосфере источника озона, отличного от фотохимического.

В результате наших предшествовавших многолетних исследований (см. список литературы) мы пришли к выводу, что единственным нефотохимическим механизмом озонобразования в зимней полярной стратосфере является радиолиз молекулярного кислорода галактическими космическими лучами (протонами ГКЛ). С учетом упомянутой выше консервативности озона происходит его накопление в нижних слоях стратосферы, что и является причиной весеннего максимума общего содержания озона в полярной и субполярной областях, поскольку процесс молекулярного кислорода в полярной стратосфере в основном ограничивается высотами 8–18 км с максимальным поглощением ГКА в высотном слое 13–16 км, то есть как раз в тех высотах, где в зимне-весенний период происходит формирование вторичного максимума в вертикальном распределении плотности озона. Этот механизм подробно описан в работе [9]. *Именно вторичный максимум* плотности озона, расположенный ниже основного максимума, и является ответственным за формирование весеннего максимума и общего содержания озона в полярных и субполярных широтах. *Именно вторичный максимум* плотности озона вносит разбаланс в фотохимическую теорию и в структуру меридионального распределения озона. По многолетним спутниковым данным мы построили среднюю картину меридионального распределения общего содержания озона в зависимости от месяца и высоты солнца. Эти результаты представлены на рис. 1, из которого очевидно, что меридиональное распределение общего содержания озона не следует изменениям высоты солнца, следовательно, фотохимической теории. Причиной этого несоответствия, как было сказано выше, является формирование очага повышенного содержания озона, связанного с воздействием галактических космических лучей на высотах 14–16 км в полярных и субполярных широтах в зимне-весенний период.

Теперь обратимся к рис. 2, на котором представлено меридиональное распределение максимальной плотности озона в стратосфере. На рис. 2 совершенно четко видно, что изоплеты изменения плотности озона в направлении экватор — полюс точно совпадают по конфигурации с изоплетами изменений высоты солнца, что однозначно указывает на несомненную сопряженность обоих явлений. Из этого следует, что процесс озонобразования находится в тесной зависимости от изменений высоты солнца, или в соответствии с фотохимической теорией. Эта глобальная картина подтверждается и на отдельно взятом примере (рис. 3), из которого следует картина почти полного

соответствия (и даже совпадения) изоплет плотности озона в стратосфере и изоплет высоты солнца. Это означает, что меридиональное распределение плотности озона в стратосфере соответствует фотохимической теории. Обратите внимание, читатель, на практически параллельный ход кривых, что однозначно указывает на то, что продуктивность озонобразования находится в очень близком соответствии со скоростью изменений высоты солнца (естественно, в относительных единицах).

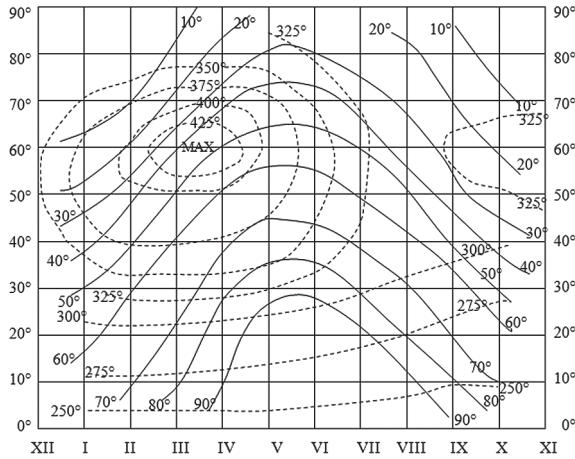


Рис. 1. Годовой ход меридионального распределения средних многолетних значений общего содержания озона за 1970–2007 гг. по результатам измерений со спутника TOMS (пунктир) и полуденной высоты солнца за 20-е число каждого месяца (сплошные линии). Оба параметра представлены в форме изоплет

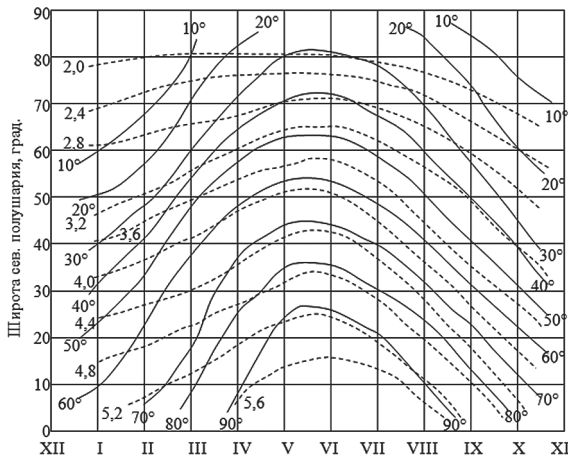


Рис. 2. Годовой ход меридионального распределения средних многолетних значений максимальной плотности озона в слое 25–30 км (пунктир) и полуденной высоты солнца за 20-е число каждого месяца (сплошные линии). Оба параметра представлены в форме изоплет

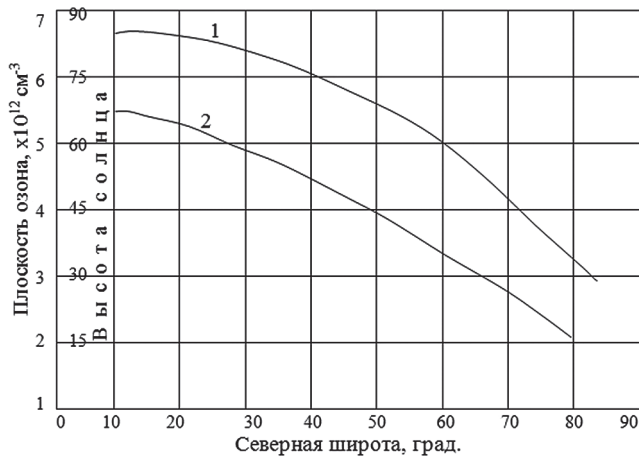


Рис. 3. Меридиональное распределение средней многолетней максимальной плотности озона в слое 25–30 км за май месяц (2) и полуденной высоты солнца за 20 мая (1)

Подведем итоги

1. Фотохимическая теория стратосферного озона достаточно точно объясняет образование озона в стратосфере на высотах 25–30 км и определяет его меридиональное распределение в соответствии с изменением высоты солнца по широтам.
2. Значения максимальной плотности озона в слое основного озонового максимума уменьшаются от экваториальных широт к полярной области в соответствии с уменьшением высоты солнца.
3. Чем больше высота солнца, тем активнее происходит процесс озonoобразования, так как доля озonoобразующей радиации увеличивается.
4. Годовой ход общего содержания озона в экваториальных и субтропических широтах находит соответствие положениям фотохимической теории, то есть максимум общего содержания озона наблюдается в летние месяцы.
5. Повышенное содержание озона в средних широтах можно рассматривать как промежуточное состояние между полярными и экваториальными широтами.
6. Фотохимическая теория не в состоянии объяснить рост общего содержания озона от экватора к полюсам. По-видимому, это обстоятельство связано с проявлением циркуляционных факторов, особенно активных на высотах ниже 20–30 км, то есть ниже максимума плотности озона.
7. Фотохимическая теория не может объяснить весенний максимум общего содержания озона в полярных и субполярных широтах. В этих регионах существенное влияние на баланс общего содержания озона оказывает ГКЛ, вызывающие дополнительное озonoобразование и формирующие вторичный максимум плотности озона на высотах 13–16 км. Разработанные авторами [5–10, 11, 12] независимые от фотохимии методы позволили получить оценки дополнительного озonoобразования, которые подтвердили данные наблюдений.

Авторы благодарят С.П. Смышляева за предоставленные данные наблюдений общего содержания и вертикального распределения плотности озона в стратосфере.

Литература

1. *Амбарцумян В.А.* К вопросу о распределении озона в земной атмосфере // Бюллетень КИСО, 1934, № 5–6, с. 30–32.
2. *Еропкин Д.И.* К вопросу о распределении озона по широте // Бюллетень КИСО, 1934, № 5–6, с. 25–27.
3. *Кондратович К.В., Горбунов О.Д.* О сопряженности магнитного поля Земли и термобарического поля озоносферы // Труды ЛГМИ, 1974, вып. 43, с. 116–120.
4. *Кондратович К.В., Осечкин В.В., Гниловской Е.В.* Оценка стока атмосферного кислорода в районы мировых аномалий с повышенной геомагнитной напряженностью / Деп. рук. — М.: ВНИИГМИ-МДЦ, № 656-ГМ., 11.11.1987. — 27 с.
5. *Осечкин В.В., Гниловской Е.В.* О происхождении весеннего максимума общего содержания озона в полярных с субполярных районах обоих полушарий / Деп. рук. — М.: ВНИИГМИ-МДЦ, № 657-ГМ, 11.06.1987. — 27 с.
6. *Осечкин В.В., Гниловской Е.В.* Оценка некоторых нуклон-ядерных взаимодействий космических лучей в озоносфере // Труды ЛГМИ, 1988, вып. 101, с. 96–104.
7. *Осечкин В.В., Гниловский Е.В., Кондратович К.В.* О взаимодействии галактических космических лучей на формирование весеннего максимума общего содержания озона в полярных и субполярных районах // ДАН, 1989, т. 305, № 4, с. 825–828.
8. *Осечкин В.В., Гниловский Е.В.* О роли высыпавшихся электронов в балансе стратосферно-мезосферного озона // Труды ЛГМИ, 1991, вып. 111, с. 103–111.
9. *Осечкин В.В., Смышляев С.П.* Механизмы формирования и разрушения вторичного максимума в вертикальном распределении плотности озона в ночной зимней полярной стратосфере // ДАН, 1993, т. 328, № 6, с. 671–673.
10. *Осечкин В.В., Гниловской Е.В.* О природе нефотохимического источника озона в стратосфере и возможности его географической идентификации // ДАН, 1997, т. 355, № 4, с. 535–539.
11. *Осечкин В.В., Гниловской Е.В., Смышляев С.П.* Что может и что не может объяснить фотохимическая теория стратосферного озона. Подводя итоги // Учёные записки РГГМУ, 2012, № 23, с. 67–77.
12. *Осечкин В.В., Гниловской Е.В., Потемкин В.Е.* Оценка дополнительного озонообразования в зимней ночной полярной стратосфере с использованием некоторых положений теории Вольтерра // Учёные записки РГГМУ, 2010, № 12, с. 74–79.
13. *Сазонов Б.И.* Высотные барические образования и солнечная активность. — Л.: Гидрометиздат, 1964. — 130 с.
14. *Сазонов Б.И.* О возможной роли частиц космических лучей в солнечно-тропосферных связях // Труды ГГО, 1966, вып. 198, с. 89–106.
15. *Anderson W.* Ozon in der Winter Stratosphere und Hoehenstralen // Z. Phys., 1929, Bd. 30, pp. 485–486.
16. *Chapman S.* XXXV. On ozone and atomic oxygen in the upper atmosphere // Philosophical Magazine and Journal of Science: Series 7, 1930, vol. 10, iss. 64, pp. 369–383.
17. *Pyle J.A., Rogers C.E.* Modelling tracer budgets in the stratosphere // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1984, vol. 110, iss. 466, pp. 1097–1105.
18. *Solomon S., Garcia S.S., Stordial F.* Transport process and ozone perturbations // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1985, vol. 90, iss. D7, pp. 12981–12989.