

*В.В. Осечкин, Е.В. Гниловской, С.П. Смышляев*

**ЧТО МОЖЕТ И ЧТО НЕ МОЖЕТ ОБЪЯСНИТЬ ФОТОХИМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ СТРАТОСФЕРНОГО ОЗОНА. ПОДВОДЯ ИТОГИ**

*V.V. Osetchkin, E.V. Gnilovskoy, S.P. Smishlyaev*

**WHAT THE PHOTOCHEMICAL THEORY OF STRATOSPHERIC OZONE CAN EXPLAIN AND WHAT IT CANNOT. SUMMING UP**

*В работе обсуждаются и обобщаются некоторые нерешённые проблемы фотохимии стратосферного озона. Предыдущие исследования, выполненные авторами за длительный период (с 1987 г.), были, в основном, направлены на выяснение условий, при которых фотохимическая теория объясняет особенности пространственно-временного распределения атмосферного озона и при которых она этого сделать не в состоянии. Показано, что теория не может объяснить происхождение весеннего максимума общего содержания, наблюдаемого в полярных районах. Авторы предлагают включить в рассмотрение проблемы фактор галактических космических лучей (ГКЛ). Тем не менее, чистая фотохимическая теория (т.е. без учёта роли ГКЛ) в состоянии объяснить с достаточной точностью пространственно-временное распределение плотности озона в слое основного озонового максимума. Сравнение оценок роли ГКЛ в распределении озона, полученных двумя независимыми методами [13, 17], с данными наблюдений, показало их хорошее соответствие.*

*Ключевые слова: зимняя полярная стратосфера, галактические космические лучи, общее содержание озона, теория Вольтерра*

*Some unsolved problems of ozone photochemical theory are discussed and generalized. The previous studies carried out by the authors for a long-term period (since 1987) had been focusing on clearing the conditions up when the mentioned theory is valid and when it is not. It is shown that the theory is not able to explain the origin of the total ozone spring maximum observed over the Polar Regions. To solve the problem the authors offer to take a factor of galactic space rays (GSR) into consideration. Nevertheless the pure photochemical theory (without considering the factor of GSR) is capable to explain with a reasonable accuracy the space-time distribution of the basic ozone density layer. The comparison of the estimates of the impact of GSR on the total ozone distribution obtained by the two independent techniques [13, 17] with the observational data turned out to be in good agreement.*

*Key words: winter polar stratosphere, galactic space rays, total ozone, the Volterra's theory*

Созданию фотохимической теории стратосферного озона предшествовало изобретение Гарольдом Митчелом Дебсоном спектрофотометра для измерения общего содержания озона, а затем организация (1927 г.) им же сети наблюдения озона в различных географических районах Земного шара. Результаты уже первых наблюдений меридионального распределения общего содержания озона от экватора в северном направлении, что противоречило общефизическим представлениям.

Однако опубликованные вскоре данные наблюдений не обескуражили другого выдающегося английского геофизика Сиднея Чепмэна [27]. Выступая в Лондонском Королевском обществе (Академия Наук Великобритании) с докладом о только что созданной им (1929 г.) фотохимической теории стратосферного озона (пять классических кислородных реакций) Чепмэн дальновидно заметил (основываясь, конечно, на данных наблюдений), что свою теорию он разработал для географического пояса, ограниченного 45-ми параллелями к северу и югу от экватора.

В 30-40-е гг. XX столетия попытки внести что-либо новое в теорию Чепмэна осуществил в СССР незаслуженно забытый астрофизик Д.И. Еропкин<sup>1</sup> [3] и в Германии – Э. Шрёер [36]. Однако ни одному из этих исследователей ничего существенного внести в теорию Чепмэна не удалось. Более того, в своём докладе Шрёер даже умудрился ни разу не сослаться на Чепмэна!

В связи с обнаруженным «необычным» природным явлением, когда в районе предполагавшегося источника (экваториальная стратосфера) озона меньше, чем в области стока (средние и полярные широты) стали появляться гипотезы, пытавшиеся объяснить наблюдавшийся эффект.

Все предлагавшиеся к этому времени гипотезы мы условно разделили на две категории: традиционные и нетрадиционные.

Традиционные гипотезы – это гипотезы, которые весенний максимум общего содержания озона в полярных и субполярных широтах объясняют с позиций динамики атмосферы.

Первую «динамическую» гипотезу предложил ещё в 1929 г. Г.М. Добсон. Суть предложенного им механизма состояла в следующем: озон в системе общей циркуляции атмосферы переносится из экваториальной стратосферы (т.е. где он, согласно гипотезе, образуется) в полярные широты с постепенным снижением высоты «центра тяжести» озонового слоя (термин, введённый ещё в 1934 г. В.А. Амбарцумяном [1], будущим знаменитым астрофизиком).

Значительно позднее (в 80-90-е гг. XX столетия) анализируя гипотезу Добсона, профессор К.В. Кондратович с присущим ему юмором назвал такой механизм «синдром булки с изюмом», т.е. «булка» (слой атмосферного воздуха) переносится в полярные широты и в системе общей циркуляции атмосферы возвращается назад к экватору, а «изюм» (озон) каким-то непонятным образом не только остаётся в полярной области, но даже от зимы к весне увеличивается в своём количестве.

Выдвигаем «крамольный» постулат: стратосферный озон образуется там, где имеют место проявления солнечной озонобразующей ультрафиолетовой радиации, т.е. **езде** за исключением полярных широт во время полярной ночи.

Заметим попутно, что озоносфера образовалась миллионы лет назад и, благодаря этому, как справедливо отмечают палеонтологи, на Земле началось развитие растительного и животного мира (подводный первичный животный мир к этому времени уже существовал). Что касается роли Солнца, то оно лишь поддерживает озоносферу

---

<sup>1</sup> Дмитрий Иванович Еропкин (1908-1936), астрофизик; работал в Главной Астрономической обсерватории (Пулково). Д.И. Еропкин, прямой потомок первого архитектора Санкт-Петербурга Н.М. Еропкина (1698-1740), был безвинно репрессирован и расстрелян в 1936 г. в одном из лагерей сталинского ГУЛАГа в Вологодской области.

в стационарном состоянии (при отсутствии мощных солнечных вспышек и других космических воздействий). Снижение же высоты «центра тяжести» озонового слоя в направлениях к полюсам связано с уменьшением высоты Солнца в тех же направлениях. К этому эффекту мы ещё вернёмся.

Гипотеза Добсона (назовём её динамическим направлением фотохимической теории) оказалась живучей. У неё нашлось много последователей, каждый из которых старался «подыскать» различные динамические параметры для объяснения происхождения весеннего максимума общего содержания озона в полярных и субполярных районах.

Среди так называемых «динамических» последователей Добсона наиболее значительными исследователями в 50-60-е гг. XX столетия были Р. Рид [35] и Р. Ньюэлл [32]. Рид объяснил происхождение весеннего максимума тропосферного озона в средних и полярных широтах за счёт усиления антициклонической активности от зимы к весне в указанных регионах, т.е. в результате увеличения скоростей крупномасштабных нисходящих движений в нижней стратосфере. Однако выполненные нами расчёты средней статической устойчивости в полярных и средних широтах [13] однозначно указали на её рост в нижней стратосфере от зимы к весне, т.е. на затухание вертикальных движений обоих знаков, а не наоборот.

Подобное исследование осуществил Ньюэлл [32], который весенний максимум общего содержания озона в полярных и средних широтах (рис. 1) объяснил усилением активности переноса озона крупномасштабными квазигоризонтальными турбулентными вихрями в полярном направлении. Упомянутый автор считал, что противогradientный поток тепла, направленный в сторону полярной стратосферы также можно объяснить исходя из предложенной им модели (т.е. воздух из холодной экваториальной стратосферы переносится в одном потоке с озоном в полярном направлении!).

В 70-80-е гг. XX столетия в связи с бурным развитием электронно-вычислительной техники и численных методов в физике атмосферы, как и в других науках, стали использоваться многочисленные модели для описания тех или иных процессов. «Модельеры» (так часто называют специалистов по численному моделированию) тут же «ухватились» за динамическую гипотезу Добсона, т.к., как в своё время заметил А.Х. Хргиан, она оказалась очень удобной для численного моделирования, но исключительно сложной для экспериментальной проверки. При этом подчеркнём, что моделирование любого физического процесса или явления, не наполненных их физическим содержанием, не имеет перспективы. Так, Пайл и Роджерс [33] для обеспечения роста общего содержания озона в полярных районах от осени к весне увеличивали коэффициенты турбулентности в стратосфере в 100-200 раз, чего в реальных условиях не наблюдается.

Тем не менее, развитие численного динамико-фотохимического моделирования дало свои плоды. С помощью численных моделей было обнаружено несоответствие данных наблюдений общего содержания озона и результатов численного моделирования. Модельерам удалось найти причину расхождения данных – в теории Чепмэна не хватало целого ряда химических и фотохимических реакций. Включение в теорию новых многочисленных реакций ( $\text{HO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{ClO}_x$  и др.) позволило устранить разбаланс в процессах озонообразования и озоноразрушения. Правда, объяснить ни годовой ход озона, ни его весенний максимум в полярных районах новые модели по-прежнему не смогли.

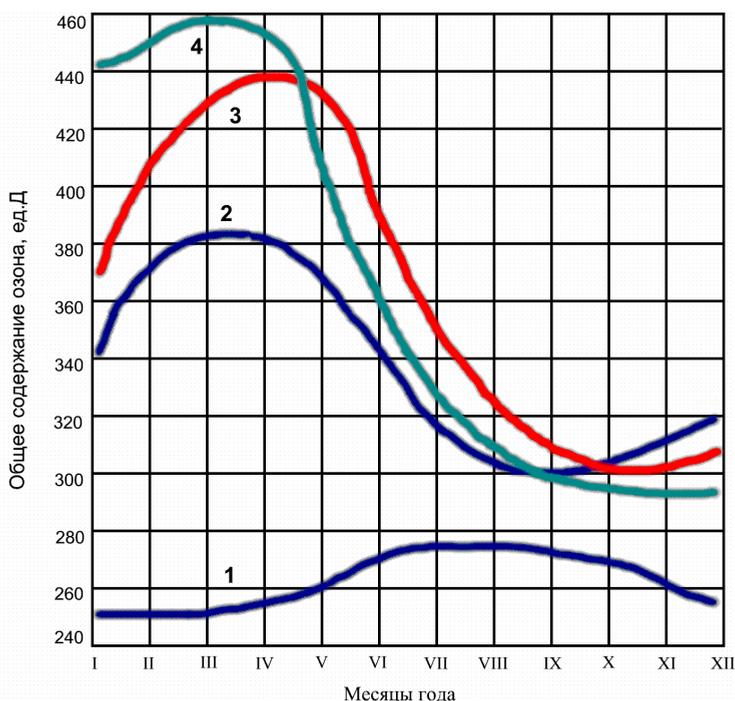


Рис.1. Годовой ход многолетних (1970 - 2007 гг.) значений общего содержания озона для различных широт северного полушария: 0 (1); 40 (2); 60 (3); 75 (4). По данным измерения со спутника TOMS.

В заключении этого раздела подчеркнём, что, несмотря на ряд нерешённых вопросов, развитие численно-фотохимического моделирования существенно обогатило наши знания о процессах образования и разрушения озона в стратосфере.

**Нетрадиционные гипотезы и механизмы**

Параллельно с развитием динамического подхода постепенно начали появляться нетрадиционные гипотезы. С этими гипотезами были связаны надежды исследователей объяснить природу меридионального распределения общего содержания озона и его годового хода.

Первой нетрадиционной гипотезой была гипотеза, выдвинутая немецким метеорологом В. Андерсоном [25]. Этот исследователь впервые обратил внимание на возможную роль космических лучей в дополнительном озонобразовании в полярной стратосфере. К сожалению, из-за недостатка наблюдательного материала (например, данных вертикального озонзондирования) и вследствие неразработанности физического аппарата исследования озоносферы в то время, Андерсону не удалось довести свою идею до конкретного механизма.

В СССР одно время была популярна гипотеза, предложенная упомянутым выше Еропкиным [3], который объяснил повышенное содержание озона в полярной стра-

тосфере на основе астрономического закона планетных расстояний (впоследствии эта гипотеза не подтвердилась).

В 60-70-е годы прошлого столетия невозможность объяснить происхождение весеннего максимума общего содержания озона в полярной области с позиций крупномасштабного переноса озона из экваториальной стратосферы стала очевидной. Отсюда в литературе стали появляться публикации [5, 6, 19, 20, 22, 26], в которых исследователи предлагали различные нетрадиционные механизмы, призванные пролить свет на природу обсуждаемого здесь явления.

Коротко рассмотрим результаты наиболее значительных работ, выполненных в указанный выше период.

В 1962-1971 гг. К.В. Кондратович совместно с О.Д. Горбуновым [6] осуществили большой цикл исследований влияния магнитного поля Земли на пространственно-временное распределение общего содержания озона в атмосфере. Упомянутые авторы обнаружили географическое совпадение очагов с повышенной геомагнитной напряжённостью (мировых магнитных аномалий), климатических высотных циклонов, климатических максимумов общего содержания озона и высокую отрицательную корреляцию между температурой воздуха в средней тропосфере и напряжённостью геомагнитного поля.

На основе обнаруженной сопряжённости К.В. Кондратович выдвинул гипотезу, суть которой состояла в следующем. В районы мировых магнитных аномалий, расположенных в полярных с субполярных широтах, происходит сток молекулярного кислорода атмосферы за счёт его высокой парамагнитной восприимчивости или ориентационного парамагнетизма. Этот механизм, как его предлагал К.В. Кондратович, и обуславливал процесс дополнительного озонообразования в полярной стратосфере. Однако оценка парамагнитного дрейфа кислорода, выполненная значительно позднее [7, 11, 14], показала, что этот эффект совершенно ничтожен. Действительно, в рассматриваемых условиях тепловое движение в атмосфере настолько значительно, что на его фоне ролью дрейфа молекулярного кислорода можно пренебречь. Тем не менее, гипотеза К.В. Кондратовича послужила стимулом для настоящих авторов для продолжения поиска нетрадиционного нефотохимического источника озонообразования в полярной стратосфере.

Ближе всех к решению рассматриваемой проблемы оказался Б.И. Сазонов [19, 20]. Исследуя влияние солнечной активности на циркуляцию верхней тропосферы и нижней стратосферы, Б.И. Сазонов выдвинул идею, согласно которой солнечные и галактические космические лучи передают свою энергию через слой озона на высотах 15-20 км. Этот исследователь предложил объяснять природу дополнительной диссоциации молекулярного кислорода (и, следовательно, дополнительного озонообразования), как результат непосредственного воздействия частиц космического происхождения (протонов) на атомы воздуха. При этом, как считал Б.И. Сазонов, главная роль в формировании радиационной (фотонной) компоненты отводилась нейтральным  $\pi$ -мезонам ( $\pi^0$ -мезонам), распад которых вызывает образование  $\gamma$ -квантов. Параллельно с этим механизмом происходит образование  $\gamma$ -квантов за счёт неупругого рассеяния нейтронов и реакций захвата нейтронов ядрами. На основе механизма, предложенного Б.И. Сазоновым, обсуждаемое здесь явление пытались объяснить В.Ф. Логинов [8] и независимо В. Арабаджи [26].

Однако последующие вычисления, выполненные в работе [12], показали, что нуклон-ядерные взаимодействия не в состоянии объяснить повышенное содержание озона в полярной стратосфере.

Рассмотрим ещё один нетрадиционный механизм, известный как электронные высыпания. Идею о возможном воздействии заряженных частиц (низкоэнергичных протонов и электронов) на баланс общего содержания озона выдвинул Мёркрей [31] ещё в 1957 г. Наблюдая полярное сияние в Анкоридже (Аляска) он обнаружил кратковременное увеличение интенсивности инфракрасного излучения ( $\lambda \approx 960$  нм) ночного неба на 18%. Мёркрей предположил, что это явление связано с увеличением интенсивности излучения озона, дополнительное содержание которого образовалось при вторжении в верхнюю атмосферу заряженных частиц. При этом вторжении низкоэнергетических протонов и электронов в верхнюю стратосферу и мезосферу приводит также к нагреванию указанных атмосферных слоёв. Первые температурные оценки теоретически получил Ишикава [28]. Впоследствии этот вопрос исследовали Келлог [29] и Маеда [30]. В частности, Маеда [30] показал, что даже при малых зенитных углах солнца во время высокой магнитной активности «корпускулярные» скорости диссоциации по порядку величины близки к скоростям фотодиссоциации молекулярного кислорода в полосе поглощения Шумана-Рунге ( $\lambda \approx 140\text{--}175$  нм). В этой же полосе средний поток энергии солнечной УФР составляет около  $300 \text{ эрг}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ , а средний поток выпадающих электронов высокой интенсивности равен  $400 \text{ эрг}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ .

В работах [21, 22, 23] выполнены модельные оценки влияния электронных высыпаний на баланс мезосферного озона. Оценки показали, что на высотах 70–80 км на третий день после высыпаний электронов плотность озона в полярной области увеличивалась на 10% от суммарного количества озона в указанном слое. Отметим, что 10% от содержания озона в слое 75–80 км составляет 0,001 ед.Д. Это означает, что любые изменения содержания озона за счёт электронных высыпаний методами наземной спектрофотометрии определить невозможно. Поэтому вызывает удивление, что авторы [9], проводившие исследования общего содержания озона в полярных широтах, обнаружили значительные межсуточные изменения общего содержания озона в полярных широтах связывали с проявлениями электронных высыпаний.

Подводя итоги данного раздела, обращаем внимание исследователей, что выполненные нами расчёты [12, 14] однозначно показали, что ни нуклон-ядерные взаимодействия ГКЛ в озоносфере, ни тормозное рентгеновское излучение, ни непосредственное воздействие электронных высыпаний на баланс озона в стратосфере не могут быть причиной повышенного содержания озона в полярных широтах. Поэтому, естественным образом, нам остаётся перейти к **главной** и заключительной части настоящей работы – к описанию гипотезы, которую мы исследовали более 20 лет (!), и которую теперь уже можно смело назвать реальным физическим механизмом.

Поиск нетрадиционного нефотохимического источника озона в стратосфере непозволительно долго затянулся. Это было связано с тем, что исследователи постоянно, в течение десятилетий (!), совершали одну и ту же ошибку. Они оценивали «ударное», или мгновенное, разовое воздействие заряженных частиц на озоносферу. Такое мгновенное воздействие в энергетическом отношении очень слабое по сравнению с солнечной ультрафиолетовой радиацией (УФР).

Механизм, предлагаемый авторами ниже, состоит в следующем. Известно, что во время полярной ночи солнечная УФР отсутствует. Также известно, что в нижней стратосфере в зимней полярной стратосфере консервативность озона в зависимости от высоты составляет от 100 до 500 суток [37]. При такой высокой консервативности 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 лит-ры) мы пришли к выводу, что единственным нефотохимическим источником озонаобразования в зимней полярной стратосфере является радиолит молекулярного кислорода протонами галактических космических лучей (ГКЛ). С учётом упомянутой выше консервативности озона происходит его накопление в зимней нижней полярной стратосфере, что и является причиной образования весеннего максимума в полярных и субполярных районах. А поскольку процесс радиолитического молекулярного кислорода в полярной стратосфере в основном ограничивается высотами 8-18 км с максимальным поглощением ГКЛ в высотном слое 13-16 км, т.е. как раз в этом слое в зимне-весенний период и происходит формирование **вторичного максимума** в вертикальном распределении плотности озона. Этот вторичный максимум расположен ниже основного озонового максимума.

Обращаем внимание исследователей, что **именно вторичный максимум** и является ответственным за весенний максимум общего содержания озона в полярных и субполярных широтах и **именно вторичный максимум** плотности озона вносит разбаланс в фотохимическую теорию (если рассматривать пространственно-временное распределение общего содержания озона). Наши оценки показали, что плотность вторичного максимума составляет в среднем 100 ед.Д [13], что соответствует данным наблюдений. Несмотря на то, что в летнее время вторичный максимум плотности озона исчезает [15], благодаря доминирующему проявлению солнечной озоноразрушающей радиации (в слое 8-18 км), тем не менее в среднем в полярной области за счёт длительности эффекта накопления озона во время полярной ночи общее содержание озона в северных широтах больше, чем в средних и, тем более, в южных широтах, т.е. **что и требовалось доказать**.

В течение длительного времени (с 1989 г) не представлялось возможным сравнить значение полученной плотности озона во вторичном максимуме ( $\approx 100$  ед.Д) с результатами вычислений, выполненных другими авторами. Причина этого обстоятельства банальна — многие исследователи до настоящего времени не принимают всерьёз роль воздействия ГКЛ на формирование вторичного максимума плотности озона и, следовательно, подобных оценок не проводилось. Справедливости ради мы должны отметить, что вскоре после нашей публикации (1989 г) появились другие работы о влиянии ГКЛ на стратосферный режим озоносферы [21, 24]. Так что не так всё плохо — появились соратники!

Чтобы географически идентифицировать регионы, в которых нефотохимический источник вносит существенный вклад в процесс дополнительного озонаобразования, мы разработали способ представления распределения плотности озона по высотам, который совершенно свободен от фотохимических и динамических «подгонок».

Для этого мы представили озоновую оболочку как сферически-симметричный слой, численное исследование которого осуществлялось на основе законов сферической тригонометрии. Результаты вычислений, выполненных по формулам В.А. Амбарцумяна [1], подтвердили тот факт, что дополнительное (нефотохимическое) накопление озона происходит в нижней стратосфере в полярных широтах. Такое накопление озона происходит особенно интенсивно в зимнее время, и этот эффект совершенно незаметен в средней стратосфере зимой и летом [16].

В последние годы авторы настоящей работы пытались найти такой независимый метод расчёта дополнительного озонообразования, который позволил бы сравнить полученную нами ранее оценку [13] с результатами вычислений, выполненных в наших последних работах [17, 18]. Разработать такой независимый метод нам помогло тщательное изучение «математической теории борьбы за существование», созданной итальянским математиком В. Вольтерра [2]. На основе этой теории нам удалось получить решение системы уравнений применительно к процессам озонообразования и озоноразрушения в указанных выше условиях на высотах 8-16 км. В результате выполненных в работах [17, 18] преобразований и соответствующих вычислений мы получили суммарное значение концентрации озона в указанной выше толще  $\approx 10^{18}$  молекул·см<sup>-2</sup>, т.е. около 100 ед.Д. Таким образом, разработанный нами независимый метод подтвердил результаты предшествовавших исследований.

Возвращаясь к упомянутому выше географическому изменению высоты солнца, обращаем внимание исследователей, что меридиональное распределение максимальной плотности озона (в его вертикальном распределении) строго следует изменению высоты солнца по широтам (рис. 2). На этом же рисунке видно, что меридиональное распределение общего содержания озона имеет ход обратный изменению высоты солнца.

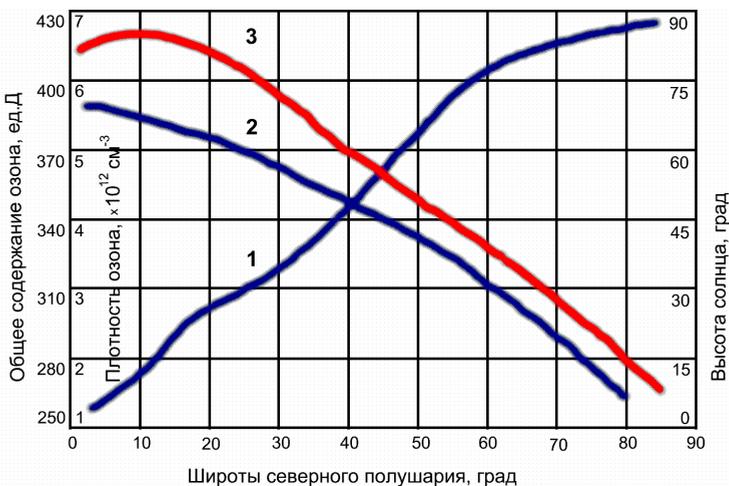


Рис. 2. Меридиональное распределение средних многолетних значений общего содержания озона (1), апрель, 1970 - 2007 гг., по данным измерений со спутника TOMS; максимальной плотности озона в слое основного максимума (2); полуденной высоты солнца за 15 апреля 2010 г (3).

### 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. «Центр тяжести» слоя озонового максимума уменьшается от экваториальной стратосферы к полярной, соответствуя уменьшению высоты солнца.
4. Чем больше высота солнца, тем активнее происходит процесс озонообразования, т.к. доля озонообразующей радиации увеличивается.
5. Годовой ход общего содержания озона в экваториальных и субтропических широтах находится соответствует положениям фотохимической теории, т.е. максимум общего содержания озона наблюдается в летние месяцы.
6. Повышенное содержание озона в средних широтах можно рассматривать как промежуточное состояние между полярными и экваториальными широтами.
7. 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, т.е. ниже максимума плотности озона.
8. 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 оказывают ГКЛ, вызывающие дополнительное озонообразование и формирующие вторичный максимум плотности озона на высотах 13–16 км. Разработанные авторами независимые от фотохимии методы позволили получить оценки дополнительного озонообразования, которые подтвердили данные наблюдений

Авторы благодарят С.С. Смирнова за выполненные им расчёты высоты солнца для различных широт.

### Литература

1. Амбарцумян В.А. К вопросу о распределении озона в земной атмосфере. — Бюл. КИСО, 1934, № 5–6, с. 30–32.
2. Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование. — М.: Наука, 1976. — 350 с.
3. Еропкин Д.И. К вопросу о распределении озона по широте. — Бюл. КИСО, 1934, № 5–6, с. 25–27.
4. Козин И.Д., Федулина И.Н., Чакаев Б.Д. Изменение общего содержания озона при возмущении космических лучей в периоды Форбуш-эффектов. — Метеорология и гидрология, 1994, № 10, с. 31–33.
5. Кондратович К.В. Долгосрочный прогноз поля давления по району Северной Атлантики в холодное время года // Дис. канд. геогр. наук. Л.: ЛГМИ, 1964. — 352 с.
6. Кондратович К.В., Горбунов О.Д. О сопряжённости магнитного поля Земли и термобарического поля озоносферы. — Труды ЛГМИ, 1974, вып. 43, с. 116–120.
7. Кондратович К.В., Осечкин В.В., Гниловской Е.В. Оценка стока атмосферного кислорода в районы мировых аномалий с повышенной геомагнитной напряжённостью. — Деп. рук. М.: ВНИИГМИ — МЦД, № 656-ГМ, 11.11.1987. — 27 с.
8. Логинов В.Ф. Географическое распределение общего содержания озона и магнитное поле Земли. — Вестник ЛГУ, 1969, № 24, с. 137–139.

9. *Нагурный А.П., Широков А.В.* Изменчивость общего содержания озона в северном околополюсном пространстве по данным экспедиции на атомном ледоколе «Сибирь» (май-июнь 1987 г) // ДАН, 1989, т. 308, № 5, с. 1099-1103.
10. *Нуждина М.А.* Квазигодичные колебания в сезонном цикле озона. – Труды ЛГМИ, 1991, вып. 111, с. 111-119.
11. *Осечкин В.В., Гниловской Е.В.* О происхождении весеннего максимума общего содержания озона в полярных и субполярных районах обоих полушарий. – Деп. рук. М.: ВНИИГМИ – МЦД, № 657-ГМ, 11.06.1987. – 27 с.
12. *Осечкин В.В., Гниловской Е.В.* Оценка некоторых нуклон-ядерных взаимодействий космических лучей в озоносфере. – Труды ЛГМИ, 1988, вып. 101, с. 96-104.
13. *Осечкин В.В., Гниловской Е.В., Кондратович К.В.* О воздействии галактических космических лучей на формирование весеннего максимума общего содержания озона в полярных и субполярных районах // ДАН, 1989, т. 305, № 4, с. 825-828.
14. *Осечкин В.В., Гниловской Е.В.* О роли выпадающих электронов в балансе стратосферно-мезосферного озона. – Труды ЛГМИ, 1991, вып. 111, с. 103-111.
15. *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.
16. *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.
17. *Осечкин В.В., Гниловской Е.В., Потемкин В.Е.* Опыт математической формализации некоторых уравнений атмосферной химии (озоновый цикл) на основе теории Вольтерра. – Уч. записки РГГМУ, 2009, № 9, с. 66-69.
18. *Осечкин В.В., Гниловской Е.В., Потемкин В.Е.* Оценка дополнительного озонобразования в зимней нижней полярной стратосфере с использованием некоторых положений теории Вольтерра. – Уч. записки РГГМУ, 2010, № 12, с. 74-79.
19. *Сазонов Б.И.* Высотные барические образования и солнечная активность. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 130 с.
20. *Сазонов Б.И.* О возможной роли частиц космических лучей в солнечно-тропосферных связях. – Труды ГГО, 1966, вып. 198, с. 89-106.
21. *Скрябин Н.Г., Моисеева В.Г., Строд С.И.* Реакция атмосферы на выпадение заряженных частиц. – В сб. Исследование динамических процессов в верхней атмосфере. – М.: Гидрометеиздат, 1979, с. 218-223.
22. *Скрябин Н.Г., Соколова В.Д., Моисеева В.Г., Семенов Я.С.* Возможность отклика атмосферы на выпадения высокоэнергичных электронов. – В сб. Физические процессы в верхней атмосфере высоких широт. – Якутск, ЯФСОАН, 1976, с. 55-68.
23. *Сосин И.И., Скрябин Н.Г.* Перестройка кислородных компонентов в мезосфере в зависимости от энергии выпадающих электронов. – Труды ЛГМИ, 1991, вып. 11, с. 120-125.
24. *Стеблова Р.С.* Озоновые дыры – результат взаимодействия Солнца и Космоса с геомагнитным полем в зимней атмосфере // ДАН, 1990, т.315, № 5, с. 1097-1102.
25. *Anderson W.* Ozone in the Winter polar stratosphaere und Hoehenstralen. – Z.Phys., 1929, Bd. 30, S. 485-486.
26. *Arabatshi W.J.* Zum Problem der Ozonentstchhung in der unteren Stratosphaere. – Ztsch. Meteorol., 1970, Bd. 21, H.8, S. 245-246.
27. *Chapman S.* On ozone and atomic oxygen in the upper atmosphere. – Phil.Mag., 1930, A10, № 64, p. 369-385.
28. *Ishikava J.* Solar corpuscular radiation as a heat source of the upper atmosphere. – Papers in Meteorol. and Geoph., 1959, vol. 10, №2, p. 93-123.
29. *Kellog W.W.* Chemical heating above the polar mesopause in winter. – J.Geoph.Res., 1961, vol. 66, № 3, p. 373-381.
30. *Maeda K.* Auroral dissociation of molecular oxygen in the polar mesosphere. – J.Geoph.Res., 1963,vol. 68, № 1, p. 185-197.
31. *Murcray W.A.* A possible auroral enhancement of infrared radiation emitted by atmospheric ozone. – Nature, 1957, № 4577, p. 139-140.
32. *Newell R.E.* Transfer through the tropopause and within the stratosphere. – Quart.J.Roy.Meteorol.Soc., 1963, vol. 89, № 380, p. 167-204.
33. *Pyle J.A., Rogers C.E.* Model tracer budget in the stratosphere. – Quart.J.Roy.Meteorol.Soc., 1984, vol. 110, № 466, p. 1087-1105.

34. *Rasool S.J.* Effect of certain extra terrestrial phenomena on atmospheric ozone and on the height of tropopause. — Proc. XII General Assembly of JUGG, Helsinki, 26.VII.1960 – 6.VIII.1960. — p. 85.
35. *Reed R.J.* Large-scale eddy flux as a mechanism for vertical transport of ozone. — J.Meteorol., 1953, vol. 10, № 4, p. 296-297.
36. *Schroer E.* Theorie der Entstehung, Zersetzung und Verteilung des atmosphäerischen Ozons. - Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone., 1949, №11, S. 13-23.
37. *Solomon S., Garsia S.S., Stordial F.* Transport process and ozone perturbations. — J.Geoph.Res., 1985, vol. D90, № 7, p. 12981-12989.