

В. В. ЗУЕВ

ВУЛКАНЫ И ОЗООНОВЫЙ СЛОЙ

Истощение атмосферного озонового слоя и появление масштабных озоновых дыр над Антарктидой, отмеченные в последние десятилетия XX в., часто связывают исключительно с техногенными факторами, без всякого учета динамики глобальных природных явлений. Колоссальное влияние на процессы, происходящие на Земле, оказывают извержения вулканов. Можно с полным основанием утверждать, что рост вулканической активности и, как следствие, длительное вулканогенное возмущение стратосферы в конце прошлого столетия стали основной причиной наблюдаемых озоновых аномалий

Ключевые слова: вулканы, индекс вулканического взрыва (VEI), плинианский, стромболианский, стратосфера, ядра конденсации, полярные стратосферные облака (ПСО), озоносфера, общее содержание озона (ОСО), хлорфторуглероды (ХФУ), депрессия стратосферного озона.
Key words: volcanoes, volcanic explosivity index (VEI), plinian, strombolian, stratosphere, condensation nuclei, polar stratospheric clouds (PSC), ozonosphere, total ozone content (TOC), chlorine-fluorine-carbons (CFC), stratospheric ozone depression



ЗУЕВ Владимир Владимирович – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор. Заместитель директора Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Томск). Лауреат Государственной премии РСФСР (1989) и премии им. академика В. А. Коптюга (2008). Автор и соавтор более 400 научных публикаций, включая 11 монографий и 7 патентов

СЛОЙ ОСОБОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Озон представляет собой аллотропную модификацию кислорода O_3 . Хотя количество озона в атмосфере мизерно (около миллионной доли процента), его роль в жизни Земли огромна. Он поглощает жесткое ультрафиолетовое излучение Солнца, представляющее смертельную опасность для биосферы. Более 85% атмосферного озона находится в стратосфере от тропопаузы, высота которой повышается от 8 км над полюсами до 18 км над экватором, до 50 км, образуя озоновый слой, озоносферу. Высота максимума озонового слоя в зависимости от широты увеличивается от 15 км в полярных зонах до 25 км в тропическом поясе. Наиболее интенсивно озон образуется и разрушается в тропической стратосфере, где солнечная радиация максимальна. Время его жизни в тропиках составляет всего несколько часов, поэтому содержание озона здесь минимально. Часть синтезированного в тропических широтах озона переносится стратосферной циркуляцией в высокие широты, где его время жизни увеличивается до 100 суток, что позволяет ему накапливаться. Поэтому его содержание в стратосфере полярных и субполярных широт больше, чем в тропическом поясе

В последнюю четверть XX в. наблюдения за озоновым слоем Земли приобрели глобальный характер благодаря космическим аппаратам. Уже в течение первых десятилетий мониторинг выявил тенденцию повсеместного истощения стратосферного озона. Хотя наблюдавшееся разрушение озонового слоя с научной точки зрения не имело однозначного объяснения, в общественное сознание активно внедрялась антропогенная концепция. Главными виновниками обнаруженной проблемы были объявлены разрушающие озон промышленные фреоны. Последние десятилетия XX в. фактически прошли под лозунгом тотальной борьбы с этим «злом».

В ее фундамент легла опубликованная в 1985 г. в журнале *Nature* статья английских ученых, в которой отмечалось значительное снижение суточных значений *общего содержания озона* (ОСО) над антарктическими станциями Фарадей и Халли в октябре 1984 г. (оно оказалось вдвое ниже средних значений за предыдущие пять лет). Это явление вызвало огромный общественный резонанс благодаря высказанной авторами гипотезе о прямой связи между угрожающими жизни





Ночная жизнь вулкана Стромболи, извергающегося практически непрерывно как минимум последние 2400 лет

ПЛИНИАНСКИЙ И СТРОМБОЛИАНСКИЙ

Плинианский тип извержения вулканов характеризуется мощными взрывными выбросами с индексом VEI не менее 4 (Volcanic Explosivity Index определяет объем вулканических выбросов по 8-балльной шкале). Извергаемые при этом столбы пепла и газов способны пробить тропопазу и достичь стратосферных высот, разнося выбросы на огромные расстояния. Длительность извержений колеблется от нескольких часов до нескольких дней. Тип извержения назван в честь древнеримского писателя Плиния Младшего, подробно описавшего извержение Везувия в 79 г. н. э.

Стромболианский тип извержения вулканов характеризуется сравнительно невысокими пульсирующими выбросами (преимущественно в виде вулканических бомб). Более сильные извержения могут происходить с интервалом в несколько лет. Высота выбросов в любом случае не превышает 2 км, индекс VEI – не более 2. Тип извержения назван по действующему островному вулкану Стромболи, находящемуся к северу от о. Сицилия

озоновыми дырами и промышленными фреонами, разрушающими озоновый слой.

Однако первые наблюдения озоновых дыр в Антарктиде были сделаны значительно раньше. В 1957–1959 гг. на той же станции Халли с помощью прибора, сконструированного Г. Добсоном, было обнаружено, что ОСО существенно снижалось в антарктическую весну (сентябрь, октябрь) и снова восстанавливалось только к началу антарктического лета (конец ноября). При обработке измерений озона на станции Дюмон-д'Юрвиль французские исследователи П. Риго и Б. Леруа установили, что 18 октября 1958 г. значение ОСО было в полтора раза ниже зарегистрированного в 1984 г.

Более того, не так давно в пузырьках воздуха, замороженных в толщу антарктического льда, украинские исследователи обнаружили вещества, очень схожие

по структуре с промышленными фреонами и в концентрации, сравнимой с современной. Однако глубина их залегания соответствует периоду тысячелетней давности.

Антропогенная концепция разрушения озонового слоя не предлагает убедительного механизма переноса промышленных фреонов из Северного полушария, где их больше всего производится и потребляется, к Южному полюсу. При этом игнорируется тот факт, что в результате вулканической деятельности и с поверхности океанов в атмосферу поступает природных фреонов на несколько порядков больше, чем техногенных.

При решении такой фундаментальной многопараметрической задачи, как разрушение озонового слоя, необходимо учитывать не только химические процессы в стратосфере, но и динамику атмосферы, солнечно-земные связи, взаимодействия атмосферы и океана. В этом же ряду, безусловно, стоит такое глобальное явление, как извержение вулканов Земли.

Извержения вулканов и стратосферный озон

Вулканическая активность Земли характеризуется широчайшим диапазоном энергий извержений и объемов вулканических выбросов. При извержениях плинианского типа в стратосфере оказывается большое количество пепла и сернистых газов, прежде всего диоксида серы, из которого в верхней части озонового слоя образуется долгоживущий сернокислотный аэрозоль. На поверхностях вулканогенного аэрозоля стратосферный озон разрушается в гетерогенных реакциях. При этом наиболее интенсивно реакции протекают на поверхностях мелкодисперсного («молодого») аэрозоля.

При вулканических извержениях плинианского типа в тропическом поясе широт происходит глобальное возмущение озоносферы. Образовавшийся в стратосфере сернокислотный аэрозоль растаскивается зональными

АНТРОПОГЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ ОЗОнового СЛОЯ

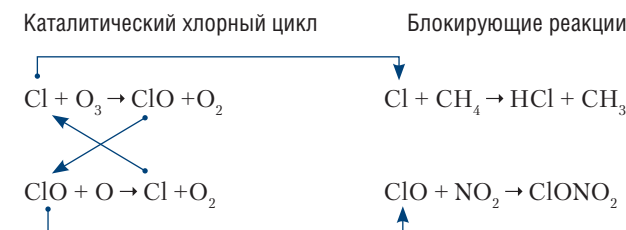
Первые предположения о значимой роли хлора в разрушении стратосферного озона были высказаны в 1974 г. рядом американских ученых, связавших наличие хлора в стратосфере с выбросами газов вулканами и твердотопливными ракетами. В том же году американские химики Ф. Роуланд и М. Молина заявили о гипотетической опасности разрушения озонового слоя накапливающимися в атмосфере промышленными фреонами, выделяющими хлор при распаде в стратосфере под действием солнечной радиации.

Промышленное производство хлорфторуглеродов (ХФУ) – фреонов, было начато химической корпорацией «Дюпон де Немур» в 1930 г. Многие годы фреоны широко применялись как хладагенты в холодильных установках, а также использовались в аэрозольных и пенных баллончиках. Одним из мировых лидеров по производству фреонов стал СССР.

Появление в 1985 г. гипотезы, связавшей озоновую дыру над Антарктидой с загрязнением атмосферы промышленными фреонами, положило начало мощной кампании по защите озонового слоя Земли от техногенного воздействия, неожиданно активно поддержанной руководством корпорации «Дюпон де Немур». Именно в эти годы корпорация освоила производство альтернативных хладагентов гидрофторуглеродов (ГФУ), не содержащих хлора, и в случае запрещения фреонов она становилась монополистом на рынке производителей «озоносберегающих» хладагентов ГФУ.

В 1985 г. была принята Венская конвенция о защите озонового слоя. Немного позже, в 1987 г., подписан Монреальский протокол, регламентирующий запрещение применения в промышленности и в быту озоноразрушающих веществ.

В 1995 г. Ф. Роуланд и М. Молина вместе с голландским химиком П. Крутценом получили Нобелевскую премию «за работу по атмосферной химии, особенно в части процессов образования и разрушения озонового слоя»



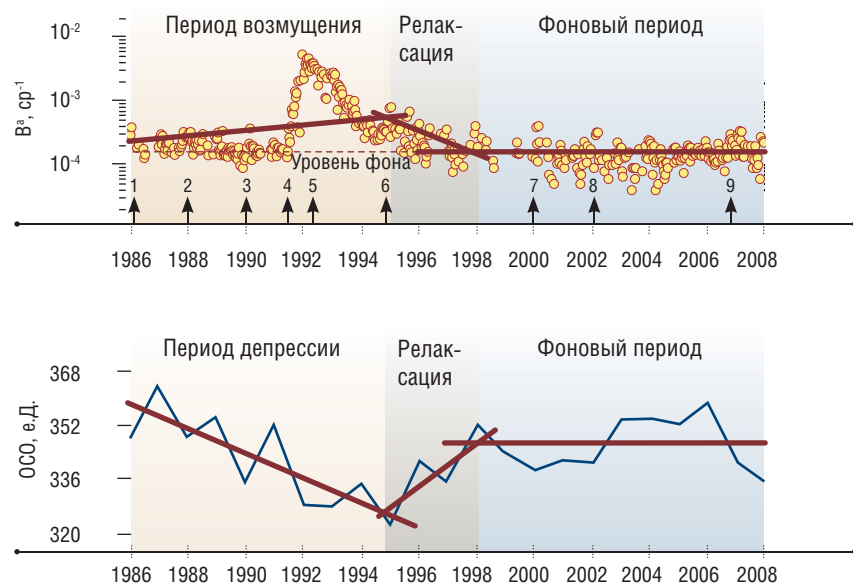
Образующийся при фотолизе фреонов хлор разрушает стратосферный озон в каталитическом цикле, который блокируется реакциями с образованием инертных молекул-резервуаров

ветрами по тропическому поясу и постепенно стягивается меридиональной циркуляцией в полярные зоны, окутывая пеленой всю планету.

Во второй половине 1980-х гг. по инициативе академика В. Е. Зуева был создан многоканальный лидарный комплекс, позволяющий дистанционно получать оперативную информацию о распределениях озона, температуры и аэрозолей в стратосфере. Многолетние наблюдения за динамикой этих параметров в периоды аэрозольных возмущений стратосферы и отсутствия таковых позволили детально проанализировать влияние стратосферного вулканогенного аэрозоля на состояние озонового слоя, провести классификацию процессов, провоцирующих его депрессию. Ранее это воздействие было изучено довольно слабо. Например, считалось, что период вулканогенной депрессии стратосферного озона не превышает нескольких месяцев. Наши исследования показали, что аэрозольные возмущения стратосферы при попадании в нее продуктов извержения играют значительную роль в разрушении озонового слоя в течение 2–3 лет, особенно после извержения вулканов тропического пояса.

Сотрудники лаборатории геосферно-биосферных взаимодействий ИМКЭС СО РАН Д. Дергалев и Н. Морозова настраивают лазерный передатчик лидарного комплекса





Противофазное поведение трендов на графиках (красные линии) демонстрирует обратную зависимость содержания озона от количества вулканогенного аэрозоля в стратосфере. Динамика интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния V^a (вверху) и общего содержания озона (внизу) в стратосфере над Томском по данным лидарных измерений в периоды ее вулканогенного возмущения, релаксации и фонового состояния на высотах 13—30 км (е.Д. — единица Добсона; ср — стеррадиан). Стрелки отмечают хронологию извержений вулканов: Августин (1), Банда Апи (2), Келут (3), Пинатубо (4), Спурр (5), Рабаул (6, 9), Гекла (7), Ревентадор (8)

Извержения плинианского типа в среднем происходят не чаще, чем раз в несколько десятков и даже сотню лет. Однако в 1979—1994 гг. только в тропическом поясе произошло более десяти таких извержений (в среднем каждые 1,5 года). Столь высокая частота вулканической активности привела к необычайно длительному периоду непрерывного загрязнения стратосферы вулканогенным аэрозолем. Когда же к концу столетия стратосфера очистилась от него, содержание стратосферного озона быстро возросло до прежнего уровня.

Из всех факторов, влияющих на озоносферу, столь динамичное изменение в последней четверти прошлого века было характерно только для аэрозольного наполнения стратосферы. Это означает, что главным регулятором состояния озонового слоя в этот период следует считать массивированное вулканогенное аэрозольное возмущение стратосферы, а не техногенные фреоны, содержание которых в атмосфере из-за большого времени жизни менялось незначительно.

Озоновая дыра Антарктиды

Активность вулканических извержений имеет прямое отношение и к антарктической озоновой аномалии. Вулканогенный аэрозоль играет роль ядер конденсации при формировании частиц полярных стратосферных облаков (ПСО) в условиях аномально низких температур в стратосфере над Антарктидой в зимне-весенний полярный период. На твердых поверхностях частиц ПСО происходит восстановление хлора из молекул-резервуаров, инициирующее образование озоновых дыр. Такой аномальный режим с температурами ниже

195 К образуется благодаря изоляции стратосферных воздушных масс внутри циркумполярного вихря.

При более высоких температурах частицы ПСО не образуются и озон не разрушается. Именно поэтому в 1986, 1988 и 2002 гг. озоновые дыры над антарктической станцией Халли были незначительными и кратковременными. Аналогичная ситуация реализуется в арктической стратосфере, где аномально низкие температуры, а с ними и озоновые дыры, наблюдаются редко и крайне непродолжительное время, хотя хлорных соединений регистрируется в Арктике не меньше, чем в Антарктиде.

Наличие ядер конденсации тесно связано с вулканогенными возмущениями стратосферы. Аэрозольные возмущения антарктической стратосферы, произошедшие после череды вулканических извержений в начале 1980-х гг. в тропическом поясе, привели к усилению в этот период разрушения стратосферного озона вплоть до состояния озоновой дыры, зарегистрированного в октябре 1984 г. на станции Халли.

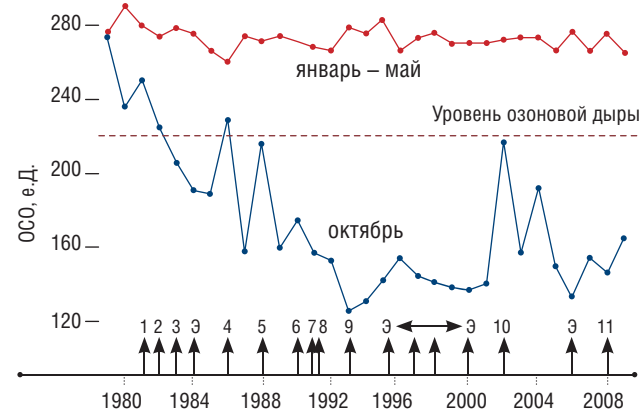
Однако наиболее сильное аэрозольное возмущение антарктической стратосферы, определившее длительную депрессию озонового слоя, возникло в период 1991—1993 гг. после трех мощнейших извержений вулканов Пинатубо (Филиппины), Серро-Хадсон и Ласкар (Чили) с индексом вулканического взрыва около 6, 5 и 4, соответственно, менее чем за два года. Как следствие, практически на всех антарктических станциях полярной весной 1993 г. наблюдалась максимально глубокая и продолжительная озоновая дыра.

Другим поставщиком вулканогенного сернокислотного аэрозоля в антарктическую стратосферу является

Извержения островного вулкана Августин вблизи Аляски (США) оказывают существенное влияние на аэрозольное возмущение стратосферы в умеренных широтах Северного полушария Земли



вулкан Эребус (Антарктида, высота 3794 м), активность которого возобновилась в 1972 г. и продолжается до сих пор. Извержения Эребуса относятся к стромболианскому типу. Однако по описанию известного вулканолога Г. Тазиева, исследовавшего вулкан в 1974 г., при его извержении вверх со скоростью более 700 км/ч выбрасываются газовые струи, состоящие, в основном, из диоксида серы, хлористого водорода и метана. При таких



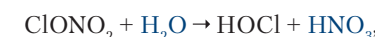
Поведение СОД над антарктической станцией Халли: стабильность в течение теплого полугодия и драматичное истощение до состояния озоновой дыры ниже уровня 220 е.Д. в период антарктической весны. Стрелками указаны годы извержений вулканов: Паган (1), Галангунг (2), Коло (3), Ласкар (4, 9), Банда Апи (5), Келут (6), Пинатубо (7), Серро-Хадсон (8), Ревентадор (10), Чайтен (11) и повышенной активности вулкана Эребус (Э)

КАК ПОЯВЛЯЮТСЯ И ИСЧЕЗАЮТ ОЗОНОВЫЕ ДЫРЫ

На твердой поверхности частиц полярных стратосферных облаков, содержащих замерзший хлористый водород HCl , в результате гетерогенных реакций в газовой фазе происходит высвобождение хлора из молекул-резервуаров хлорнитрата ClONO_2 с одновременным захватом в твердой фазе диоксида азота в виде замерзшей азотной кислоты. С завершением полярной зимы под действием солнечной радиации молекулы хлора распадаются на атомы. Появление свободного хлора в весенний период катализирует реакции распада озона в хлорном цикле. Озоновой депрессии способствует и связанность диоксида азота, блокирующего образование хлора. Так с наступлением антарктической весны в границах полей ПСО формируется озоновая дыра, исчезающая при испарении частиц облаков с повышением стратосферных температур к концу весеннего периода.



или



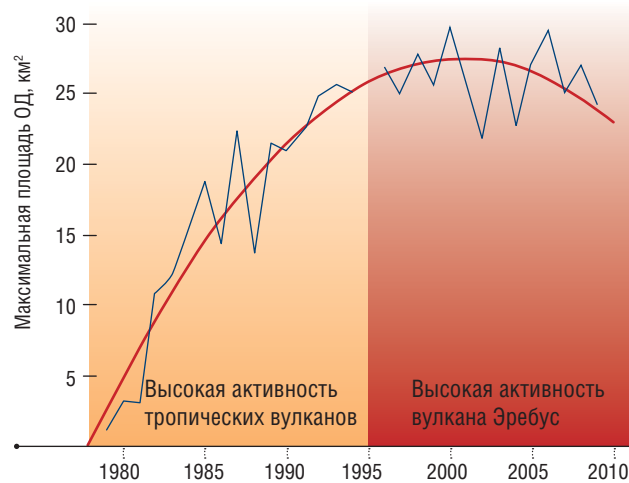
Реакции восстановления хлора из хлорнитрата на поверхности частиц ПСО в условиях полярной ночи ответственны за образование озоновых дыр над Антарктидой (твердые реагенты показаны синим цветом)



Извержение вулкана Галангунг (Индонезия) в декабре 1982 г. сыграло важную роль в увеличении озоновой дыры над Антарктидой, как было отмечено в журнале *Nature* (1985 г.)

скоростях они быстро достигают стратосферных высот, где из диоксида серы формируется сернокислотный аэрозоль, выступающий ядрами конденсации частиц ПСО. Замерзающий в них хлористый водород обеспечивает эффективность описанных выше гетерогенных реакций на их поверхностях. Метан, блокируя хлорный цикл, также способствует накоплению хлористого водорода в стратосфере.

Значительное повышение активности Эребуса наблюдалась в 1995–2007 гг. Частые сильные извержения вулкана во второй половине 1990-х гг. препятствовали росту весенних значений ОСО, наметившемуся после минимума 1993 г. Самые мощные серии извержений наблюдались в 2000 и 2006 гг. Именно в эти годы были



Определяемое по спутниковым данным изменение максимальной площади озоновой дыры над Антарктидой по годам (синяя линия). Параболический тренд (красная линия) демонстрирует тенденцию ее уменьшения после 2000 г.

зарегистрированы самые большие размеры озоновой дыры за весь период наблюдений – почти 30 млн км².

Достижению рекордных размеров озоновой дыры в 2000 г. также способствовали аэрозольные ядра конденсации из ионных кластеров, возникших в антарктической стратосфере после мощнейшей вспышки на Солнце как раз в период зимне-весеннего формирования ПСО. Ионные кластеры обладают активированной (заряженной) поверхностью, что дополнительно усиливает процессы разрушения озона.

Сегодня сценарий борьбы с разрушением озонового слоя пытаются использовать для решения другой глобальной проблемы. Основным виновником потепления климата вновь объявляется техногенный фактор. Опять необоснованно занижается роль глобальных природных явлений, в частности изменения обмена CO₂ между атмосферой и океаном при увеличении температуры его поверхности и роста активности вулканов, в газовых выбросах которых содержится много углекислого газа.

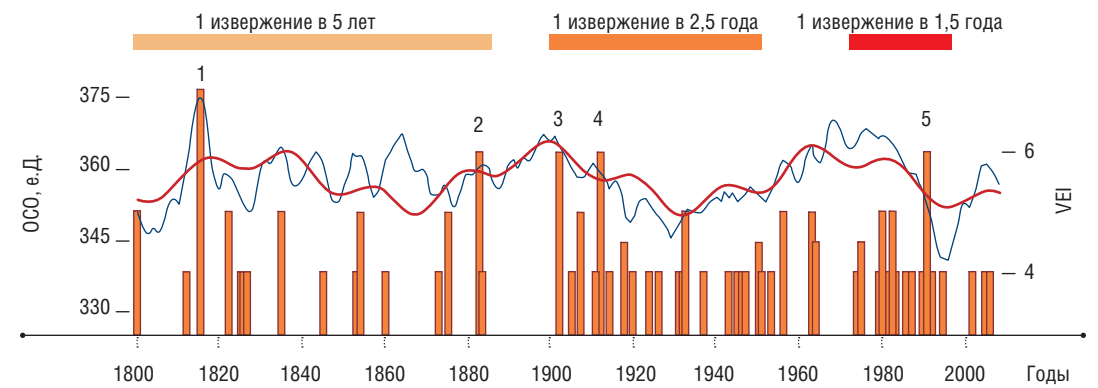
К сожалению, ситуация усугубляется тем, что современные научные данные о поступлении вулканогенного диоксида углерода в атмосферу очень сильно разнятся. Геологи считают, что вулканы выбрасывают не менее нескольких миллиардов тонн CO₂ в год, а климатологи используют в своих моделях величину, фактически на порядок меньшую – 0,3 млрд.

В условиях такой неопределенности нельзя пренебрегать тем, что за последние 200 лет (в период индустриальной революции) количество ежегодных вулканических извержений на Земле выросло почти вчетверо. При этом и значительное увеличение числа мощных вулканических извержений, и ускорение роста содержания углекислого газа в атмосфере в последней четверти XX в. происходило синхронно.

ВУЛКАНЫ И ОЗОНОВЫЙ СЛОЙ В РЕТРОСПЕКТИВЕ

Используя биоиндикационный метод реконструкции ОСО по плотности годичных колец темновойных деревьев, удалось расшифровать многовековое поведение озонового слоя в субарктическом поясе широт, выявить цикличность колебаний ОСО с периодами, в основном совпадающими с периодами солнечных циклов. Оказалось, что наиболее сильно проявляются колебания с периодами 22 года и 66 лет. Первый цикл совпадает с известным солнечным циклом Хейла. Вторым, вероятнее всего, связан с главным циклом Солнечной системы, отражающим гравитационное взаимодействие ее главных тел – Солнца, Юпитера и Сатурна.

Периоды вулканогенных депрессий озонового слоя в субарктическом поясе широт характеризуются отрицательными отклонениями относительно основных циклических колебаний. В отрицательной фазе циклических колебаний эти отклонения усиливаются, а в положительной фазе – ослабляются. По этой причине депрессия озонового слоя после мощнейшего извержения вулкана Кракатау в 1883 г. проявилась незначительно. Напротив, уступающее ему по мощности извержение вулкана Пинатубо в 1991 г. совпало с минимумом циклических колебаний озоносферы. В условиях длительной непрерывной вулканогенной депрессии озонового слоя сложение отрицательных колебаний ОСО благодаря синергетическому эффекту вызвало аномальное снижение ОСО в 90-х гг. прошлого столетия



Динамика общего содержания озона в субарктическом поясе широт на протяжении двухсот лет, реконструированная по плотности годовых колец темновойных деревьев (синяя линия), и составляющая гармонических колебаний ОСО, обусловленная солнечными циклами, кратными 22 и 66 годам (красная линия).

Столбцы показывают хронологию извержений вулканов с индексом VEI более 4. Цифрами помечены наиболее мощные извержения вулканов: Тамбора (1), Кракатау (2), Санта-Мария (3), Катмай (4) и Пинатубо (5)

Литература

- Зуев В.В., Бурлаков В.Д. *Сибирская лидарная станция: 20 лет оптического мониторинга стратосферы*. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2008. 226 с.
- Зуев В.В., Бондаренко С.Л. *Исследование озоносферы методами дендрохронологии*. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2007. 160 с.
- Зуев В.В. *Лидарный контроль стратосферы*. Новосибирск: Наука. 2004. 307 с.
- Калмановский И. *Управление климатом* // GEO. 2008. № 8. С.132–143
- Кашкин В.Б., Хлебопрос Р.Г. *Озоновые дыры – «дети» стратосферных вихрей* // НАУКА из первых рук. 2007. № 1(13). С. 70–77 www.volcano.si.edu, www.theozonehole.com

В статье использованы фотографии вулканов с сайта www.ngdc.noaa.gov/hazard/volcano.shtml Министерства торговли, Национального управления по исследованию океанов и атмосферы и Национальной информационной службы спутниковых данных об окружающей среде США