

УДК 551.51

Роль крупных вулканических извержений в разрушении стратосферного озона и деградации хвойных лесов

В.В. Зуев¹, Н.Е. Зуева¹, Е.С. Савельева¹,
Е.М. Короткова², А.В. Павлинский^{1*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

²Томский государственный архитектурно-строительный университет
634003, г. Томск, Соляная пл., 2

Поступила в редакцию 20.10.2021 г.

В результате крупных извержений тропических вулканов в стратосферу выбрасывается большое количество вулканогенного аэрозоля, способствующего формированию положительных температурных и отрицательных озоновых аномалий в нижней тропической стратосфере. Крупные извержения с индексом вулканической взрывчатости $VEI \geq 5$ способны вызывать глобальную депрессию озоносферы. Вулканогенное повышение температуры нижней тропической стратосферы приводит к увеличению стратосферного меридионального температурного градиента и последующему усилению полярного вихря. В условиях зимне-весеннего усиления вихря формируются полярные озоновые аномалии. Стратосферные аномалии озона вследствие усиления УФ–Б-радиации могут проявляться в деградации хвойных лесов, которые служат биосферным индикатором климатических изменений. Массовое очаговое усыхание темнохвойных лесов наблюдается в горных районах Южной Сибири с середины 1990-х гг. в условиях увеличения приземной УФ–Б-радиации в результате истощения озонового слоя после извержения вулкана Пинатубо.

Ключевые слова: крупные вулканические извержения, вулканогенный аэрозоль, тропическая стратосфера, депрессия озонового слоя, усыхание хвойных лесов; large volcanic eruptions, volcanic aerosol, tropical stratosphere, stratospheric ozone depletion, degradation of coniferous forests.

Введение

Стратосферный аэрозольный слой в основном составляют частицы сернокислотного аэрозоля, представляющие собой микрокапли 75%-го водного раствора серной кислоты H_2SO_4 [1]. Одним из источников стратосферного аэрозоля являются крупные вулканические извержения, выбрасывающие в стратосферу большое количество диоксида серы SO_2 , где из него в течение нескольких недель при окислении и обводнении образуется сернокислотный аэрозоль [2]. В результате крупных извержений концентрация его может увеличиваться на 1–2 порядка [3]. Значимое воздействие на стратосферу способны оказывать извержения с индексом вулканической взрывчатости $VEI \geq 4$, в особенности тропических вулканов. Извержения с $VEI \geq 5$ могут оказывать влияние на климат Земли в течение нескольких лет [4].

В настоящей работе, представленной в номере журнала, посвященном 50-летию Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, приведены основные результаты исследований лаборатории геосферно-биосферных взаимодействий (ЛГБВ) в области влияния крупных вулканических извержений на озоновый слой и биосферу Земли за последние 10 лет. Рассмотрены причины формирования температурных и озоновых аномалий в тропической стратосфере после крупных вулканических извержений с точки зрения состава вулканогенного аэрозоля. Охарактеризована роль вулканогенного повышения температуры нижней тропической стратосферы в формировании полярных озоновых аномалий. Рассмотрены последствия вулканогенной депрессии озонового слоя для биосферы, проявляющиеся, в частности, в деградации хвойных лесов. Таким образом, можно проследить детерминистскую связь геосферно-биосферных процессов: крупное извержение тропического вулкана → вулканогенная депрессия озоносферы (связанная как с прямым разрушением озона на вулканогенном аэрозоле, так и с формированием полярных озоновых аномалий) → усыхание хвойных лесов в условиях увеличения приземной УФ–Б-радиации.

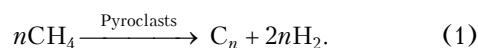
* Владимир Владимирович Зуев (vzuev@list.ru);
Нина Евгеньевна Зуева (n11.zueva@yandex.ru); Екатерина
Сергеевна Савельева (esav.pv@gmail.com); Екатерина
Михайловна Короткова (katia_sova@mail.ru); Алексей
Валерьевич Павлинский (wf@inbox.ru).

Роль крупных вулканических извержений в формировании озоновых аномалий в тропической стратосфере

Как правило, после крупных извержений тропических вулканов, например Эль-Чичон (VEI = 5, апрель 1982 г.) и Пинатубо (VEI = 6, июнь 1991 г.), в течение нескольких лет в тропической стратосфере наблюдаются температурные и озоновые аномалии [3, 4]. Результаты исследований причин продолжительных вулканогенных температурных и озоновых аномалий в тропической стратосфере с точки зрения состава вулканогенного аэрозоля представлены в цикле работ [5–11]. Вулканогенными аэрозолями в стратосфере считаются быстро оседающий пепел и долгоживущий сернокислотный аэрозоль. В течение первого полугодия после извержения озоновые и температурные аномалии обусловлены присутствием вулканического пепла. Сернокислотный аэрозоль эффективен в каталитических циклах разрушения озона только в полярных и субполярных широтах, где он может способствовать протеканию гетерогенных реакций активации хлора из пассивной молекулы-резервуара ClONO_2 [12]. В тропической стратосфере эти реакции неэффективны из-за активного фотоллиза HNO_3 , способствующего увеличению NO_2 , который взаимодействует с ClO с образованием ClONO_2 , блокируя хлорный цикл разрушения озона. Длительную депрессию стратосферного озона можно объяснить присутствием в вулканических выбросах наноразмерного черного углерода, характеризующегося длинным временем жизни в стратосфере (1,5–4 года) и высокой вероятностью разрушения озона на его поверхности ($\gamma \approx 2 \cdot 10^{-3}$) [10].

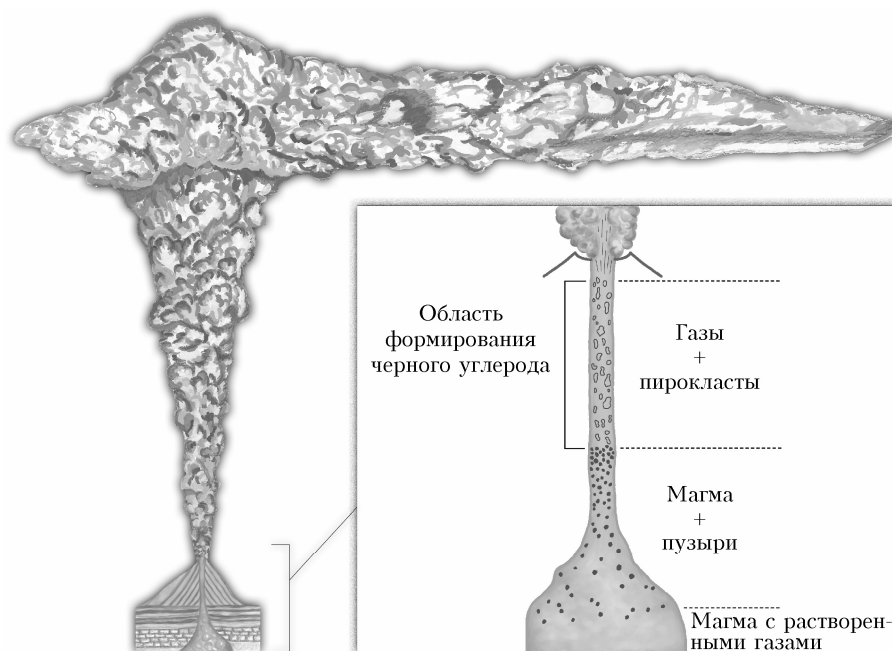
На присутствие в выбросах черного углерода может указывать наличие в составе вулканических газов монооксида углерода CO , образующегося в реакциях окисления углерода [13, 14].

Вулканы являются природными химическими реакторами. В условиях высоких температур, повышенного давления и большого разнообразия химических соединений становится возможным протекание множества уникальных химических реакций, особенно в условиях плиннианского извержения. Согласно общей схеме плиннианского извержения [13] при перемещении магмы из магматической камеры в вулканический канал высвобождаются растворенные в ней газы, которые формируют пузыри (рисунок). Высвобождение газов по мере подъема магмы приводит к тому, что расплавленная часть магмы начинает кристаллизоваться, образуя пирокластический материал. В этой области вулканические газы находятся в окружении раскаленного пирокластического материала (закристаллизовавшейся магмы) при температуре $\sim 1000^\circ\text{C}$ в бескислородной (или слабокислородной) среде. Здесь черный углерод может формироваться при термическом разложении метана CH_4 на раскаленных поверхностях пирокластов:



В верхней части канала и непосредственно в эруптивной колонне при скоростях, близких к сверхзвуковым, создаются условия для отщепления черного углерода от пирокластического материала и его измельчения (рисунок).

Таким образом, причиной продолжительных температурных и озоновых аномалий в нижней тропической стратосфере после крупных вулканических извержений с высокой степенью вероятности может



Механизм формирования черного углерода в вулканическом канале при плиннианском извержении

быть содержащийся в вулканических выбросах наноразмерный черный углерод, формирующийся в вулканическом канале при термическом разложении метана на раскаленных поверхностях пирокластов в процессе плиннианского извержения.

Влияние вулканических извержений на формирование полярных озоновых аномалий

Повышение температуры нижней тропической стратосферы после крупных вулканических извержений способствует увеличению стратосферного меридионального температурного градиента и последующему усилению полярного вихря, сопровождающемуся формированием озоновой аномалии [15]. Динамика полярных вихрей под влиянием изменений стратосферного меридионального температурного градиента рассмотрена в серии работ [15–18]. Полярные вихри представляют собой крупномасштабные циклоны, распространяющиеся от тропопauses в мезосферу и существующие с осени по весну. Масштабы и интенсивность разрушения стратосферного озона над полярной областью зависят от силы и устойчивости полярного вихря в зимне-весенний период [19–23]. Осенне-зимние извержения тропических вулканов с $VEI = 3-4$ и высотой выброса не менее 18 км (наряду с извержениями тропических вулканов с $VEI \geq 5$) способствуют зимне-весеннему усилению северного вихря, протекающему с формированием арктических озоновых аномалий. Около 70% арктических озоновых аномалий сформировалось в результате усиления северного полярного вихря после крупных вулканических извержений [15]. В Южном полушарии усиление вихря при вулканогенном потеплении нижней тропической стратосферы если и проявляется, то практически незаметно на фоне традиционно высокой активности антарктического вихря, обусловленной сезонным ходом температуры нижней субтропической стратосферы [16–18].

Роль депрессии озоносферы в усыхании хвойных лесов

Последствия вулканогенной депрессии озоносферы для биосферы, проявляющиеся, в частности, в деградации хвойных лесов, рассмотрены в цикле работ [24–27]. Массовое очаговое усыхание темнохвойных лесов наблюдается в горных районах Южной Сибири (Кузнецкий Алатау, Западный и Восточный Саяны, Хамар-Дабан) с середины 1990-х гг. Непосредственной причиной образования очагов усыхания леса считается развитие корневых патогенов и размножение насекомых-вредителей, поражающих ослабленные древостои. Ослабление деревьев происходит под воздействием множества экосистемных факторов, а если их совокупность превышает

адаптационные возможности дерева, то дерево гибнет. Синхронность массового образования очагов усыхания темнохвойных лесов на территориях Кузнецкого Алатау, Саян и Хамар-Дабана в 1990-х гг. указывает на усиление в этот период общего для этих территорий фактора негативных экосистемных воздействий. В качестве такого фактора выступило увеличение уровня приземной УФ–Б-радиации в результате истощения озонового слоя в 1990-х гг. после извержения вулкана Пинатубо. Повышенные дозы УФ–Б-радиации вызывают у растений многочисленные прямые и косвенные реакции, включая ухудшение метаболизма, фотосинтеза и транспирации, роста, морфогенеза и других процессов. Формирование очагов усыхания хвойных лесов на территории гор Южной Сибири с середины 1990-х гг. происходило в пределах зоны максимального снижения общего содержания озона (вплоть до 12%) при соответствующем увеличении приземного уровня УФ–Б-радиации в диапазоне 300–310 нм на 36–72%.

Заключение

В настоящей работе приведены результаты исследований в области влияния крупных вулканических извержений на озоновый слой и биосферу Земли, проявляющиеся, в частности, в усыхании хвойных лесов. На основе многолетних исследований разработан новый подход к обоснованию продолжительных озоновых и температурных аномалий в нижней тропической стратосфере после крупных вулканических извержений, предполагающий учет роли вулканогенного черного углерода. Предложен механизм образования черного углерода в вулканическом канале при термическом разложении метана на раскаленных поверхностях пирокластов в процессе плиннианского извержения. Продолжительные озоновые аномалии в тропической стратосфере после крупных вулканических извержений могут приводить к глобальной депрессии озоносферы (например, как это наблюдалось после извержения вулкана Пинатубо в 1991 г. [28]).

Вулканогенное повышение температуры нижней тропической стратосферы способствует увеличению стратосферного меридионального температурного градиента и последующему усилению полярного вихря, протекающему с формированием полярной озоновой аномалии. Около 70% арктических озоновых аномалий сформировалось в результате усиления северного полярного вихря после крупных вулканических извержений. Депрессия озонового слоя (вследствие усиления УФ–Б-радиации) может проявляться в деградации хвойных лесов, которые служат биосферным индикатором климатических изменений. Массовое очаговое усыхание темнохвойных лесов после извержения вулкана Пинатубо наблюдается в горных районах Южной Сибири с середины 1990-х гг.

При крупнейших вулканических извержениях могут наблюдаться значительные климатические изменения согласно модели «ядерной зимы», где

черный углерод в стратосфере играет определяющую роль. При извержениях супервулканов с VEI ~ 8 в стратосферу может быть выброшено > 1 Мт черного углерода. Численное моделирование последствий выброса в тропическую стратосферу такого количества черного углерода показывает практически полное разрушение озоносферы [29].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН (№ 121031300156-5).

1. *Зуев В.В.* Лидарный контроль стратосферы. Новосибирск: Наука, 2004. 307 с.
2. *Зуев В.В., Бурлаков В.Д.* Сибирская лидарная станция: 20 лет оптического мониторинга стратосферы. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2008. 226 с.
3. *Зуев В.В.* Вулканы и озоновый слой // Наука из первых рук. 2010. Т. 34, № 4. С. 68–75.
4. *Зуев В.В.* Тропические вулканы и климат Арктики // Наука в России. 2013. № 5. С. 33–40.
5. *Зуев В.В., Зуева Н.Е.* Вулканогенные возмущения стратосферы — главный регулятор долговременного поведения озоносферы в период с 1979 по 2008 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 30–34.
6. *Зуев В.В., Зуева Н.Е., Куценогий П.К., Савельева Е.С.* Вулканогенный нанодисперсный углеродный аэрозоль в стратосфере // Химия уст. разв. 2014. Т. 22, № 1. С. 83–88.
7. *Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С., Шелехов А.П., Шелехова Е.А.* О роли вулканогенного разогрева тропической стратосферы в формировании очагов тепла в арктических регионах // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 1. С. 69–74; *Zuev V.V., Zueva N.E., Savelyeva E.S., Shelekhov A.P., Shelekhova E.A.* The role of volcanic heating of the tropical stratosphere in formation of heat centers in the Arctic regions // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 3. P. 262–267.
8. *Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С., Баженов О.Е., Невзоров А.В.* О роли извержения вулкана Мерapi в аномальном понижении ОСО над Томском в апреле 2011 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 12. С. 1090–1094; *Zuev V.V., Zueva N.E., Savelyeva E.S., Bazhenov O.E., Nevzorov A.V.* On the role of the eruption of the Merapi volcano in an anomalous total ozone decrease over Tomsk in April 2011 // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 3. P. 298–303.
9. *Зуев В.В., Крупчатников В.Н., Боровко И.В.* Влияние сильных извержений тропических вулканов на климат внетропических широт // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 5. С. 404–408.
10. *Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С.* Температурные и озоновые аномалии как индикаторы вулкано-генной сажи в стратосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 8. С. 698–704; *Zuev V.V., Zueva N.E., Savelyeva E.S.* Temperature and ozone anomalies as indicators of volcanic soot in the stratosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 1. P. 100–106.
11. *Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С.* Вулкано-генный фактор усиления стратосферно-тропосферного обмена // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 12. С. 1068–1072.
12. *Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С.* Специфика формирования антарктической и арктической озоновых аномалий // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 5. С. 407–412.
13. *Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Rymer H., Stix J.* The Encyclopedia of Volcanoes. London: Academic Press, 2015. 1421 p.
14. *Martinez-Alonso S., Deeter M.N., Worden H.M., Clerbaux C., Mao D., Gille J.C.* First satellite identification of volcanic carbon monoxide // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39, N 21. P. L21809.
15. *Zuev V.V., Zueva N.E., Savelyeva E.S.* The role of the Mt. Merapi eruption in the 2011 Arctic ozone depletion // Atmos. Environ. 2017. V. 166. P. 327–333.
16. *Zuev V.V., Savelyeva E.* The cause of the spring strengthening of the Antarctic polar vortex // Dynam. Atmos. Oceans. 2019. V. 87. P. 101097.
17. *Zuev V.V., Savelyeva E.* The cause of the strengthening of the Antarctic polar vortex during October–November periods // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019. V. 190. P. 1–5.
18. *Зуев В.В., Боровко И.В., Крупчатников В.Н., Савельева Е.С.* Влияние температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря // Оптика атмосфер. и океана. 2020. Т. 33, № 5. С. 415–418; *Zuev V.V., Borovko I.V., Krupchatnikov V.N., Savelyeva E.S.* Influence of the temperature of the lower subtropical stratosphere on Antarctic polar vortex dynamics // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 6. P. 708–711.
19. *Зуев В.В., Савельева Е.С.* Динамика стратосферных полярных вихрей. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2020. 115 с.
20. *Zuev V.V., Savelyeva E.* The role of the polar vortex strength during winter in Arctic ozone depletion from late winter to spring // Polar Sci. 2019. V. 22. P. 100469.
21. *Zuev V.V., Savelyeva E.* Arctic polar vortex dynamics during winter 2006/2007 // Polar Sci. 2020. V. 25. P. 100532.
22. *Zuev V.V., Zueva N.E., Savelyeva E.S., Gerasimov V.V.* The Antarctic ozone depletion caused by Erebus volcano gas emissions // Atmos. Environ. 2015. V. 122. P. 393–399.
23. *Зуев В.В., Савельева Е.С., Павлинский А.В.* Беспрецедентная озоновая аномалия в арктической стратосфере в зимне-весенний период 2020 г. // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 495, № 2. С. 36–40.
24. *Зуев В.В., Зуева Н.Е., Короткова Е.М.* Сравнительный анализ рядов наблюдений общего содержания озона и УФ–В-радиации в зонах произрастания бореальных лесов // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 10. С. 914–920; *Zuev V.V., Zueva N.E., Korotkova E.M.* The comparative analysis of observational series of total ozone content and UV-B radiation in boreal forest zones // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 1. P. 67–72.
25. *Зуев В.В., Зуева Н.Е., Короткова Е.М., Павлинский А.В.* Влияние истощения озонового слоя на процессы деградации хвойных лесов южных регионов Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 1. С. 27–34; *Zuev V.V., Zueva N.E., Korotkova E.M., Pavlinsky A.V.* Impact of ozone depletion on degradation processes of coniferous forests in southern regions of Siberia // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 4. P. 342–348.
26. *Зуев В.В., Зуева Н.Е., Короткова Е.М., Бендер О.Г.* Исследование отклика фотосинтетического аппарата ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на двухлетнее воздействие повышенных доз УФ–В-радиации // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 9. С. 799–805.
27. *Зуев В.В., Короткова Е.М., Павлинский А.В.* Климатически обусловленные изменения растительного покрова тайги и тундры Западной Сибири в 1982–2015 гг. по данным спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 66–76.

28. Zuev V.V., Burlakov V.D., Nevozorov A.V., Pravdin V.L., Savelieva E.S., Gerasimov V.V. 30-year lidar observations of the stratospheric aerosol layer state over Tomsk (Western Siberia, Russia) // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17, N 4. P. 3067–3081.
29. Kravitz B., Robock A., Shindell D.T., Miller M.A. Sensitivity of stratospheric geoengineering with black carbon to aerosol size and altitude of injection // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, N 9. P. 1–22.

V.V. Zuev, N.E. Zueva, E.S. Savelieva, E.M. Korotkova, A.V. Pavlinsky. **The role of large volcanic eruptions in stratospheric ozone depletion and degradation of coniferous forests.**

As a result of large eruptions of tropical volcanoes, a large amount of volcanic aerosol is emitted into the stratosphere and contributes to the formation of positive temperature and negative ozone anomalies in the lower tropical stratosphere. Large eruptions with VEI ≥ 5 can cause global ozone loss. A volcanic increase in the temperature of the lower tropical stratosphere leads to an increase in the stratospheric meridional temperature gradient and the subsequent strengthening of the polar vortex. Polar ozone depletion occurs under the conditions of the winter-spring strengthening of the vortex. Stratospheric ozone anomalies due to increased UV-B radiation can manifest themselves in the degradation of coniferous forests, which serve a biosphere indicator of climate change. Massive focal drying of dark coniferous forests has been observed in the mountainous regions of Southern Siberia since the mid-1990s under conditions of an increase in surface UV-B radiation as a result of ozone depletion after the eruption of Mount Pinatubo.