

УДК 551.21

Влияние сильных извержений тропических вулканов на климат внетропических широт

В.В. Зуев^{1,2}, В.Н. Крупчатников^{1,3}, И.В. Боровко^{3,4*}

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

² *Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

³ *Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт
630090, г. Новосибирск, ул. Советская, 30*

⁴ *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6*

Поступила в редакцию 2.03.2017 г.

После мощных извержений тропических вулканов в стратосфере наблюдается значительное повышение температур относительно многолетних норм. Наблюдаемые температурные аномалии объясняются поглощением вулканогенным аэрозолем коротковолновой радиации Солнца и длинноволновой восходящей радиации Земли. С помощью спектральной модели общей циркуляции промежуточной сложности проанализирован отклик циркуляции атмосферы на изменения коэффициентов пропускания коротковолновой радиации в стратосфере в условиях вулканических выбросов углеродных аэрозолей, поглощающих радиацию. Результаты моделирования демонстрируют существенные различия между реакцией в Северном и Южном полушариях. Показано, что приземные температурные аномалии в южных полярных регионах могут наблюдаться в течение 10 лет после тропических извержений.

Ключевые слова: вулканическое извержение, аэрозоль, стратосфера, температура, циркуляция, изменение климата; volcanic eruption, aerosol, stratosphere, temperature, circulation, climate change.

Введение

Глобальное потепление крайне неоднородно. Наиболее чувствительны к климатическим изменениям полярные регионы. Потепление в Арктике приводит к существенным потерям ледового покрова Северного Ледовитого океана, особенно в районе п-ов Чукотка и Аляска. Значительное изменение альbedo океанической поверхности стимулирует новые климатические изменения. Поэтому исследование влияния различных факторов на климат полярных регионов является актуальной проблемой.

Вулканическая активность вносит значительный вклад в динамику климата на масштабах от нескольких лет до десятилетий. Формирующий при крупном вулканическом извержении аэрозольный слой влияет на климатический режим поверхности Земли, поглощая и рассеивая как приходящую солнечную радиацию, так и уходящее тепловое излучение. Известно, что в результате ослабления коротковолновой радиации вулканическим аэрозолем происходит уменьшение средней температуры

поверхности Земли. Значительно менее изучено влияние вулканов на различные циркуляционные структуры атмосферы. Например, в [1] была показана связь извержения вулканов с Арктической осцилляцией, а в [2] исследован отклик океана на крупные тропические извержения. Влияние вулканического аэрозоля на климат рассмотрено также в [3–5]. В [6] показано, что температурные аномалии в стратосфере тропического пояса вызывают формирование приземных очагов тепла в районе п-ов Чукотка и Аляска.

Наряду с изменениями радиационных потоков после крупных извержений тропических вулканов наблюдается динамическая реакция тропосферы на неоднородность нагрева верхних слоев атмосферы. Увеличение градиента температуры в стратосфере из-за нагрева тропической стратосферы и градиента высоты тропопаузы приводит к усилению полярного вихря в нижней стратосфере. В результате динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы в Северном полушарии наблюдается потепление приземного воздуха в средних широтах, при этом первая и вторая зимы после извержения характеризуются положительной фазой Североатлантической осцилляции [1]. В [7] на основе анализа данных за последние 500 лет выявлено, что следующей зимой после извержения тропического вулкана происходит потепление в Европе. Наиболее вероятной причи-

* Владимир Владимирович Зуев (vzvzev@imces.ru); Владимир Николаевич Крупчатников (vkrupchatnikov@yandex.ru); Ирина Владимировна Боровко (irina.borovko@yandex.ru).

ной этого является динамический отклик на увеличение градиента температуры в нижней стратосфере.

Анализ данных многолетних измерений температуры на тропических метеостанциях показывает, что после крупных извержений вулканов с показателем $VEI \geq 5$ (Volcanic Explosivity Index) в стратосфере наблюдается повышение температур, сохраняющееся около двух лет [8]. Наибольшее потепление тропической стратосферы наблюдалось после извержений вулканов Агунг (Индонезия, март 1963), Эль-Чичон (Мексика, март–апрель 1982) и Пинатубо (Филиппины, июнь 1991). Оно достигало 2°C в нижней стратосфере тропических широт после извержений всех трех вулканов [8], а максимальное потепление уровней поверхности 30 и 50 мбар, превышающее 4°C , было зарегистрировано на экваторе через 3 мес после извержения вулкана Пинатубо в сентябре 1991 г. [9].

Основным долгоживущим продуктом извержения вулкана является сернокислотный аэрозоль, который находится в стратосфере более двух лет с момента извержения. Сернокислотный аэрозоль имеет полосы поглощения в тепловой части ИК-спектра и способен перехватывать восходящую тепловую радиацию Земли, вызывая разогрев стратосферы. Однако он прозрачен в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра, поэтому не способен поглощать коротковолновую радиацию Солнца. Основным компонентом вулканического аэрозоля, поглощающим солнечную радиацию, является вулканический пепел, но его время жизни в стратосфере составляет всего около полугода. Поскольку поглощение коротковолновой солнечной радиации остается значительным в течение двух лет после извержения, в [10] предложено рассматривать вулканические выбросы углеродного аэрозоля, время жизни которого в стратосфере составляет 3–4 года.

В данной работе исследуется динамическая реакция циркуляции атмосферы на изменение коэффициентов пропускания радиации в стратосфере в результате извержения вулкана с $VEI \sim 6$ (на примере извержения вулкана Пинатубо, произошедшего 15 июня 1991 г. на Филиппинах).

Численный эксперимент

Для оценки влияния вулканических извержений на климат был проведен численный эксперимент с помощью модели климатической системы Planet Simulator, разработанной в Метеорологическом институте Гамбургского университета [11]. Динамическое ядро этой модели составляет спектральная модель общей циркуляции атмосферы на основе безразмерных уравнений невязкой адиабатической гидростатической атмосферы на вращающейся сфере [12]. По вертикали используется конечно-разностная аппроксимация. В модели с помощью параметризации учтены влажностные процессы и конвекция, радиационные процессы, поверхностные потоки и вертикальная диффузия. Океанический блок представлен моделями перемешанного слоя и динамики льда. Динамика биосферы описывается моделью SIMBA.

Используемая модель относится к классу моделей промежуточной сложности, предназначенных для изучения отдельных процессов и обратных связей и воспроизведения базовой физики атмосферы. Ее достоинством является то, что она позволяет адекватно описать волновые динамические процессы в атмосфере.

Сценарий моделирования можно разделить на три периода. Первый, контрольный период («без возмущения») составлял 40 лет. Для выхода модели на стационарный режим она предварительно разгонялась в течение 20 лет модельного времени. Второй, «возмущенный» период составлял 2 года. Для этого периода на основе данных для извержения вулкана Пинатубо была построена параметризация коэффициентов пропускания [13]:

$$\tau = \begin{cases} 0,2(1 - \sin \varphi), & \varphi > 30^\circ; \\ 0,2\cos(9/4(\varphi + 10^\circ)) + 0,1, & -10 < \varphi < 30^\circ; \\ 0,2\cos(9/2(\varphi + 10^\circ)) + 0,1, & -30 < \varphi < -10^\circ; \\ 0,2(1 + \sin \varphi), & \varphi < -30^\circ; \end{cases} \quad (1)$$

φ — широта ($-90^\circ, 90^\circ$), положительная широта соответствует Северному полушарию, отрицательная — Южному.

Для этого периода коэффициенты пропускания атмосферы уменьшились в e^{τ^*} раз, где $\tau^* = \tau\alpha(\sigma)$ — параметризация оптической толщи слоя атмосферы согласно формуле (1); σ — вертикальная координата, равная отношению давления в точке (P) к приземному давлению (P_s);

$$\alpha = \begin{cases} 0,015, & \sigma = 0,05; \\ 0,115, & \sigma = 0,15; \\ 0,025, & \sigma = 0,25 \end{cases} \quad (2)$$

— коэффициент, зависящий от высоты.

Предполагалось, что максимальное количество аэрозоля находилось на уровне 150 мбар над 10° ю.ш. в результате переноса южной ячейкой Гадлея. Считалось, что коротковолновая радиация поглощается углеродными аэрозольными частицами, представляющими «абсолютно черное тело». В этом случае суммарное поглощение на 10° ю.ш. составляет около 4% приходящей коротковолновой радиации Солнца. В третий период, как и в первый, поглощение солнечной радиации атмосферным аэрозолем полагалось пренебрежимо малым. Этот период составлял 10 лет.

Результаты численного моделирования

Динамические поля для периода с измененными коэффициентами пропускания сравнивались с полями для контрольного периода. Максимальное потепление в верхней стратосфере ($P = 50$ мбар) достигало 4°C (рис. 1), что соответствует данным наблюдений в сентябре 1991 г. после извержения вулкана Пинатубо [9]. Полярный вихрь усиливается как в Южном, так и в Северном полушариях, что приводит к похолоданию в полярных областях.

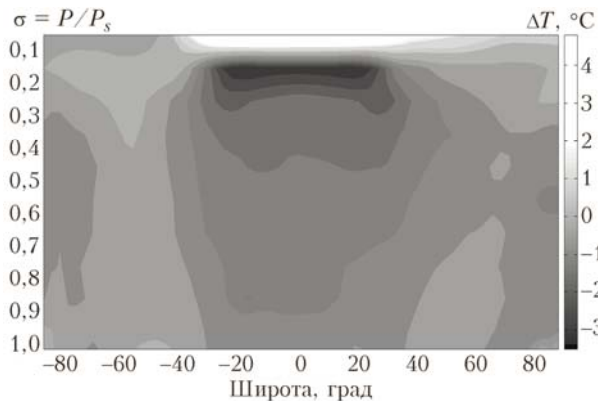


Рис. 1. Широтно-высотный разрез разности средних температур за второй и первый периоды

В летний период отклик на поверхности Земли зонально несимметричен. В Северном полушарии происходит похолодание в Атлантике и потепление в Тихом океане и на Аляске (рис. 2, *а, б*). Зимой происходит похолодание в полярных широтах Северного полушария и потепление в средних широтах, особенно в континентальных районах. Устанавливается положительная фаза Североатлантической осцилляции. В Южном полушарии потепление в средних широтах значительно слабее и не приводит к уменьшению площади морского льда.

Динамические поля, полученные для третьего периода, также сравнивались с полями для кон-

трольного периода (рис. 2, *в, г*). В третий период наблюдается статистически значимое понижение температур в Антарктиде в среднем на 2 °С как зимой, так и летом. Возможная причина долговременных климатических аномалий – увеличение площади морского льда и альбедо. В период с января по март изменения усредненных полей во внетропических широтах Северного полушария сопоставимы с межгодовой изменчивостью. Максимальное изменение средней температуры поверхности Земли составляет 0,7 °С (рис. 3). После выключения радиационного форсинга время возвращения климатической системы к начальному состоянию составляет около 10 лет.

На рис. 4 приведена динамика среднезимних температур, усредненных по широте. В полярных широтах Северного полушария температура, усредненная за период с января по март второго года после извержения, меньше средней за те же месяцы первого периода приблизительно на 3 °С (рис. 4, *а*). Однако уже в первый год после отключения форсинга температурные аномалии малы по сравнению с межгодовой изменчивостью.

Динамика температуры южных полярных широт значительно отличается от наблюдаемой в Северном полушарии. Температурные аномалии в период действия форсинга относительно небольшие, но на второй и третий годы третьего периода они достигают 2 °С (рис. 4, *б*). За весь третий период (10 лет) на 71,2° ю.ш. средняя за зиму температура ни разу не превышала среднеклиматических значений.

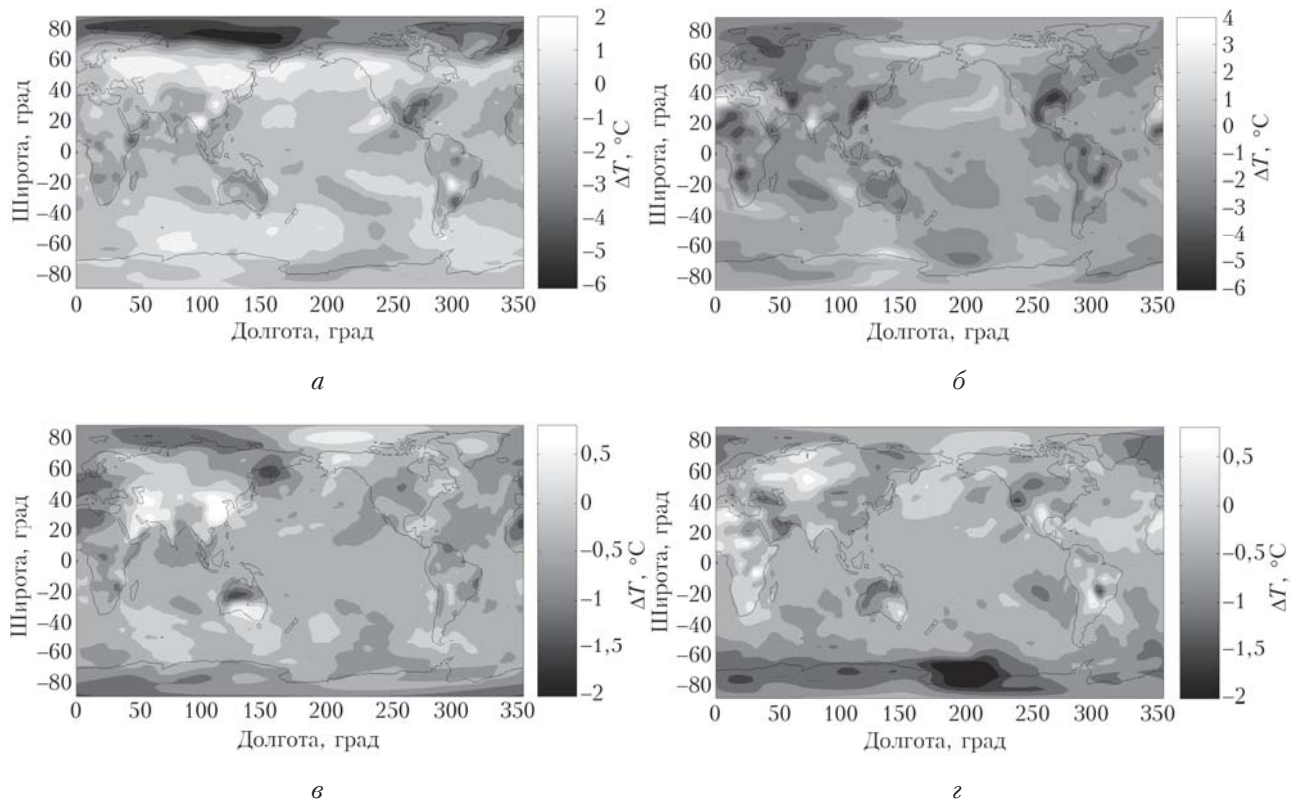


Рис. 2. Разность средних температур на поверхности Земли между вторым годом второго периода и первым периодом (*а, б*) и третьим и первым периодами (*в, г*), усредненные с января по март (*а, в*) и с июля по сентябрь (*б, г*)

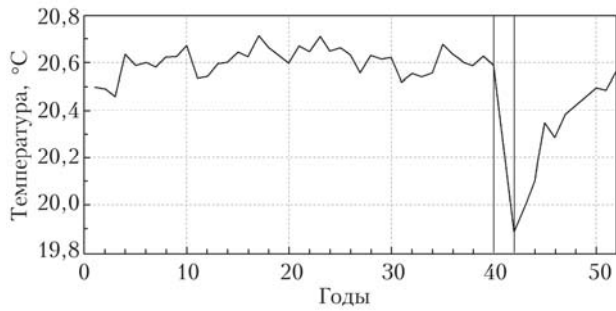


Рис. 3. Временная динамика средней температуры у поверхности Земли. Вертикальными линиями отмечены моменты начала и конца действия форсинга

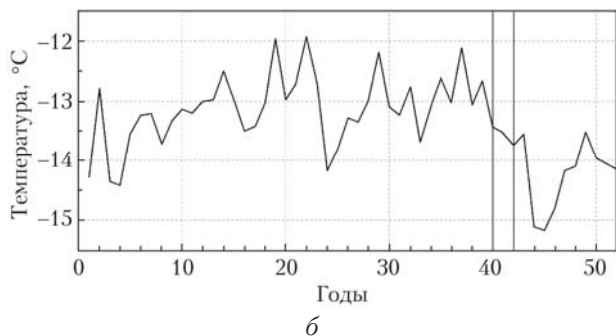
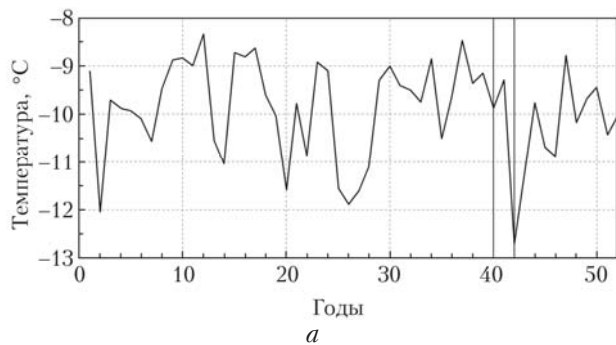


Рис. 4. Временная динамика среднеширотной температуры для $71,2^\circ$ с.ш. (а) и $71,2^\circ$ ю.ш. (б). Вертикальными линиями отмечены моменты начала и конца действия форсинга

Для анализа межгодовой изменчивости климатических полей использовался математический аппарат эмпирических ортогональных функций. Представление полей в виде суммы эмпирических ортогональных функций позволяет выделить главные моды изменчивости. Собственные значения корреляционной матрицы показывают, какая часть естественной изменчивости описывается соответствующей функцией. Первой естественной ортогональной функцией давления на уровне моря являются кольцевые моды, которые тесно связаны с Североатлантической осцилляцией. Были посчитаны эмпирические ортогональные моды для полей давления за контрольный срок. Главной модой определяется 14,5% изменчивости. По сравнению с модой, соответствующей Арктической осцилляции, максимум смещён в сторону Гренландии, появляется еще один центр действия в районе Дальнего Востока.

Проекция аномалий давления на главную моду считалась как скалярное произведение нормированного вектора главной моды и аномалии (рис. 5).

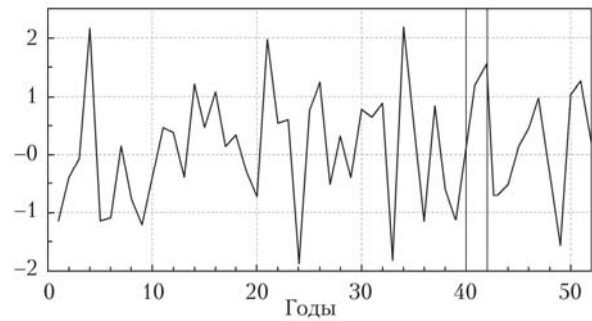


Рис. 5. Индекс главной моды (проекция аномалии давления на главную моду, деленная на среднее квадратическое отклонение). Вертикальными линиями отмечены моменты начала и конца действия форсинга

В период воздействия вулканического аэрозоля проекции на главную моду оказываются положительными, однако после отключения форсинга индекс главной моды принимает отрицательные значения. В третий период индекс главной моды принимает как положительные, так и отрицательные значения. Таким образом, анализ главных мод изменчивости подтверждает, что динамика тропосферы внетропических широт Северного полушария возвращается к первоначальному состоянию практически сразу после завершения аэрозольного нагрева стратосферы.

Заключение

Реакция циркуляции атмосферы на изменение коэффициентов пропускания коротковолновой радиации в стратосфере существенно отличается в Северном и Южном полушариях. В Северном полушарии преобладает динамическая реакция, связанная с увеличением разности средних температур и давлений между средними и высокими широтами и положительной фазой Североатлантической осцилляции в течение первых двух лет после извержения. В зимний период в арктических широтах наблюдается похолодание, в то время как в средних регистрируется потепление, которое способствует уменьшению площади снегового покрова и альбедо. Средняя температура в полярных широтах выходит на начальный уровень практически сразу после возвращения климатической модели к первоначальному радиационному режиму.

В Южном полушарии вследствие увеличения площади льда и альбедо наблюдается систематическое понижение температур в Антарктиде как в зимний, так и в летний период. Температурные аномалии в Антарктиде сохраняются в течение 10 лет после установления начального режима.

В модели используется достаточно простой океанический блок, не позволяющий в достаточной мере оценить влияние вулканических извержений

на океан. Поэтому следующим этапом численного моделирования должно стать использование совместной модели динамики атмосферы и океана.

1. *Stenchikov G., Robock A., Ramaswamy V., Schwarzkopf M.D., Hamilton K., Ramachandran S.* Arctic Oscillation response to the 1991 Mount Pinatubo eruption: Effects of volcanic aerosols and ozone depletion // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107, N 24. P. ACL 28-1–16.
2. *Ding Y., Carton J.A., Chepurin G.A., Stenchikov G., Robock A., Sentman L.T., Krasting J.P.* Ocean response to volcanic eruptions in Coupled Model Inter-comparison Project 5 simulations // *J. Geophys. Res.: Oceans.* 2014. V. 119, N 9. P. 5622–5637.
3. *Martin R.S., Mather T.A., Pyle D.M., Power M., Allen A.G., Aiuppa A., Horwell C.J., Ward E.P.W.* Composition-resolved size distributions of volcanic aerosols in the Mt. Etna plumes // *J. Geophys. Res. D.* 2008. V. 113, N 17. P. 1–17.
4. *Mather T.A., Pyle D.M., Oppenheimer C.* Volcanism and the Earth's Atmosphere. Tropospheric Volcanic Aerosol / A. Robock, C. Oppenheimer (eds.) // *Geoph. Monog. Ser.* 2003. V. 139. P. 189–212.
5. *Hartmann D.L., Mouginis-Mark P.J.* Volcanoes and climate effects of aerosols / R. Greenstone, M.D. King (eds.) // *EOS science plan: Executive summary.* Washington, D.C.: NASA, 1999. P. 339–378.
6. *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 атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 1. С. 69–74; *Zuev V.V., Zueva N.E., Savel'eva E.S., Shelekhov A.P., Shelekhova E.A.* The role of volcanic heating of the tropicalstratosphere in formation of heat centers in the arctic regions // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 3. P. 262–267.
7. *Fischer E.* Regional and seasonal impact of volcanic eruptions of European climate over the last centuries: Diploma thesis. Bern: University of Bern, 2003. 137 p.
8. *Angell J.K.* Stratospheric warming due to Agung, El Chichon, and Pinatubo taking into account the quasi-biennial oscillation // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 102, N 8. P. 18775–18785.
9. *Labitzke K., McCormick M.P.* Stratospheric temperature increases due to Pinatubo aerosols // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19, N 2. P. 207–210.
10. *Зуев В.В., Зуева Н.Е., Куценогий П.К., Савельева Е.С.* Вулканогенный нанодисперсный углеродный аэрозоль в стратосфере // *Химия в инт. уст. разв.* 2014. Т. 22, № 1. С. 83–88.
11. *Fraedrich K., Jansen H., Kirk E., Luksch U., Lunkeit F.* The Planet Simulator: Towards a user friendly model // *Meteorol. Z.* 2005. V. 14, N 3. P. 299–304.
12. *Hoskins B.J., Simmons A.* A multi-layer spectral model and the semi-implicit method // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1975. V. 101, N 429. P. 637–655.
13. *Зуев В.В., Бурлаков В.Д.* Сибирская лидарная станция: 20 лет оптического мониторинга стратосферы. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2008. 226 с.

V.V. Zuev, V.N. Krupchatnikov, I.V. Borovko. Climatic response of extratropics to intense tropical eruptions.

A substantial temperature rise regarding long-term rates is observed in the stratosphere due to intense tropical eruptions. The detected temperature anomalies account for volcanogenic aerosol absorption of short-wave solar radiation and outgoing longwave radiation. An intermediate complexity spectral model of general circulation was used to analyze the atmospheric circulation response to variations in transmission coefficients of short-wave radiation in the stratosphere after volcanic emissions of carbon aerosols which absorb the radiation. The results show considerable differences in the Northern and Southern hemisphere responses. Surface temperature anomalies in the southern polar region may be observed for 10 years following tropical volcanic eruptions.